

## Модификация поверхности никеля фемтосекундными лазерными импульсами

*Б.Б. Костишко, В.В. Светухин, И.О. Явтушенко*

*Научно-исследовательский технологический институт  
им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета*

## Modification of Nickel Surface Due to Femtosecond Laser Pulses

*B.B. Kostishko, V.V. Svetukhin, I.O. Yavtushenko*

*Ulyanovsk State University  
S.P. Kapitsa Technological Research Institute*

Представлены экспериментальные данные формирования периодической субмикронной структуры на поверхности поликристаллического никеля (Ni) под действием лазерного излучения на воздухе и в жидкой среде (дистиллированной воде). Методами электронной микроскопии определена геометрия образующихся поверхностных структур: при облучении на воздухе структура формируется над основной поверхностью образца, а при облучении в жидкости – ниже нее. Определен размер наночастиц чистого Ni, образующихся при лазерной абляции никелевого образца в жидкости.

*Ключевые слова:* лазерное структурирование; наноструктуры; наночастицы; плазмон-поляритон.

The experimental data of the submicron periodic structures that are due to the laser radiation in air in a liquid medium (distilled water) on the surface of the polycrystalline nickel formed have been presented. By the electron microscopy methods the geometry of the formed surface structures has been defined: under irradiation in the air the structure is formed above the sample main surface, and under irradiation in liquid – below. The size of the pure nickel nanoparticles, produced by laser ablation formed by laser ablation of the nickel sample in liquid, has been measured.

*Keywords:* laser structuring; nanostructures, nanoparticles; plasmon-polariton.

**Введение.** Лазерная модификация поверхности материалов [1–3] актуальна в настоящее время в связи с важностью решаемых задач и перспективностью возможных приложений. Под воздействием лазера, в зависимости от его интенсивности и длины волны, в зоне облучения могут наблюдаться следующие эффекты: подплавление, абляция и изменение структуры поверхности, например образование микрорельефа, а также фазовые превращения второго рода, например изменение проводимости [4]. С развитием лазерной техники возможно управляемое микро- и наноструктурирование поверхно-

сти различных материалов [3] благодаря эффектам, связанным с возникновением на границе раздела материалов поверхностных электромагнитных волн плазмон-поляритонного типа и их интерференцией с первичным лазерным излучением [2, 5] (так называемая плазмон-поляритонная модель (ППМ)). Формируемые поверхностные периодические структуры могут представлять собой дорожки (линейно-периодический, одномерный, рельеф), микроострия или микрократеры (двухмерный рельеф), вследствие чего находят много приложений в микросенсорике, нанофотонике и нанотехнологиях.

С развитием лазерной физики осваиваются новые диапазоны излучения лазеров как по длинам волн и предельным ультракоротким длительностям импульсов, так и по рекордным интенсивностям, что открывает возможности для новых эффектов и применений. Известно, что уменьшение длительности импульсов до десятков фемтосекунд позволяет практически полностью исключить термические эффекты [4]. Формирующийся под воздействием лазера линейно-периодический рельеф, с хорошей точностью описываемый в рамках ППМ, экспериментально наблюдается на металлах с низкой теплопроводностью и высокой температурой плавления – титане [6], стали [7] либо на полупроводниковых монокристаллах кремния, германия [1, 8]. Однако при переходе к другим материалам возникают экспериментальные и физические ограничения в получении четко упорядоченного рельефа на поверхности облучаемых материалов.

В настоящей работе описаны условия получения линейно-периодической структуры на поверхности поликристаллического никеля (Ni) под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

**Эксперимент.** Особенность экспериментов – использование иттербиевого волоконного лазера с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм, пиковой мощностью  $W = 10$  МВт, длительностью импульсов  $\tau = 300$  фс и регулируемой частотой их следования  $\nu$  в диапазоне 1 кГц – 1 МГц. С помощью линейно-поляризованного излучения ( $p$ -поляризации) лазера обрабатывалась пластина чистого Ni на воздухе и при погружении в дистиллированную воду.

Облучаемая поверхность (торец цилиндра) предварительно подвергалась механической полировке с использованием полирующей суспензии. Лазерный луч фокусировался на поверхность образца с помощью кварцевой линзы с фокусным расстоянием  $f = 100$  мм, расположенной на расстоянии 130 мм от излучателя. Образцы закреплялись на трехкоординатном поворотном столике, который перемещался для фокусировки пучка на плоскости образца и его контролируемого вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (рис.1). Излучение лазера проходит через поляризационную пластину, фокусируется с помощью микролинзы, отражается от зеркала и попадает на поверхность образца через слой жидкости. Изображение поверхности образца получали с помощью сканирующего электронного микроскопа PHENOM PRO-X.

Согласно ППМ период образующихся структур зависит от угла падения, длины волны лазерного излучения и характеристик облучаемого материала и может быть описан следующим выражением [8]:

$$d = \lambda \left( \sqrt{\frac{|\epsilon_m| \cdot \epsilon_c}{|\epsilon_m| - \epsilon_c}} \pm \sin \theta \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения;  $\epsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость металла;  $\epsilon_c$  – диэлектрическая проницаемость среды, граничащей с облучаемым металлом;  $\theta$  – угол падения.

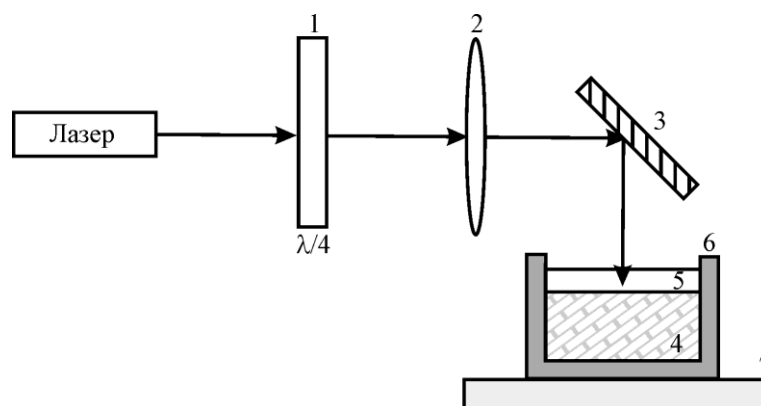


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – поляризационная пластина; 2 – микролинза; 3 – зеркало; 4 – поверхность образца; 5 – слой жидкости; 6 – кювета; 7 – трехкоординатный столик

Для случая облучения металлического образца на воздухе  $\epsilon_c = 1$ ,  $|\epsilon_m| \gg 1$ . Тогда выражение (1) примет вид

$$d = \frac{\lambda}{1 \pm \sin \theta}.$$

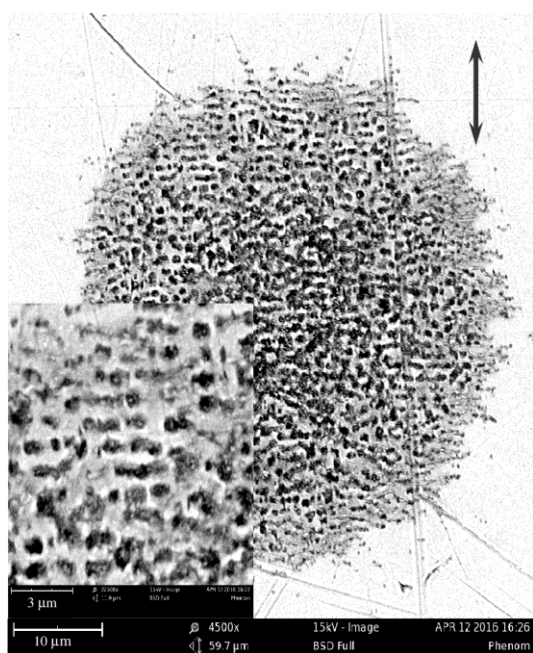


Рис.2. Область облучения образца Ni на воздухе при плотности мощности излучения  $Q = 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (стрелкой указано направление вектора поляризации излучения, на вставке – увеличенный участок)

В отличие от микрорельефа на стали [7] на никелевом образце получение четкой линейно-периодической структуры оказалось затруднено (рис.2). Это может быть связано с различиями в термодинамических свойствах материалов: в два раза более высокой проводимостью, увеличивающейся с температурой, и более низкой температурой плавления Ni. Это приводит к меньшей локализации структурных превращений, происходящих под воздействием лазерного излучения, и неустойчивости образующихся периодических структур. Однако на периферии области облучения фиксируются отдельные фрагменты повторяющегося с периодом порядка  $\lambda$  рельефа, перпендикулярного вектору поляризации излучения лазера (см. рис.2).

Для более быстрого теплоотвода поверхность образца покрывалась слоем жидкости (дистиллированной водой) толщиной 1,5 мм, что, в свою очередь, привело к изменению оптических параметров взаимодействия лазера с образцом. Наличие водной про-

слойки модифицирует выражение (1), так как в данном случае  $\epsilon_c = \epsilon_{H_2O}$ :

$$d \approx \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_c} \pm \sin \theta}.$$

Это должно привести к уменьшению характерного периода возникающих структур, что и наблюдается в эксперименте.

На рис.3 представлена линейно-периодическая структура с характерным размером порядка 300 нм. Наличие жидкого слоя приводит к возникновению рельефа не над основной поверхностью образца, как в случае облучения на воздухе [7], а в его глубине. За счет сканирования лазерным лучом поверхности материала возможна модификация макроразмерных областей.

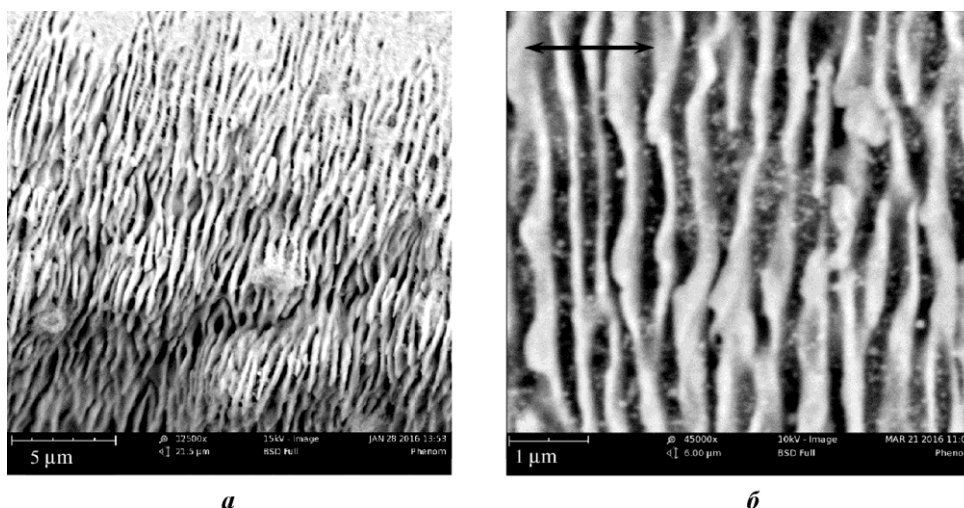


Рис.3. Линейно-периодический рельеф, формируемый при облучении Ni в воде при  $Q = 1,6 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>: а – без смещения луча; б – со смещением луча со скоростью 50 мкм/с (стрелкой указано направление вектора поляризации излучения)

Длительное воздействие лазерного излучения на поверхность металла приводит к его выработке в зоне облучения за счет процесса лазерной абляции [4]. При этом окружающая металл среда (дистиллированная вода) насыщается частицами облучаемого металла, формируя коллоидный раствор. В ходе анализа коллоидного раствора с помощью лазерного микроанализатора Microtrac BlueWave определен диапазон размеров образующихся частиц (рис. 4). Возможность регулирования как мощности лазерного излучения, так и частоты следования импульсов позволяет варьировать дозу облучения, поглощаемую поверхностью металла, тем самым задавая условия лазерной абляции.

Дифрактометрический анализ полученного из раствора порошка показал наличие только кристаллической фазы чистого Ni с кубической гранецентрированной структурой (параметр решетки  $a = 0,3521$  нм). Это позволяет использовать данную методику для получения коллоидных растворов и порошков чистых металлов.

Проводимость поверхностного слоя является одним из основных факторов в образовании поверхностных плазмон-поляритонов, интерферирующих с падающим излучением, и формировании лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур согласно ППМ [1]. Размер отдельных элементов определяется оптическими параметрами раствора, в котором происходит облучение, а также толщиной слоя жидкости над облучаемой поверхностью.

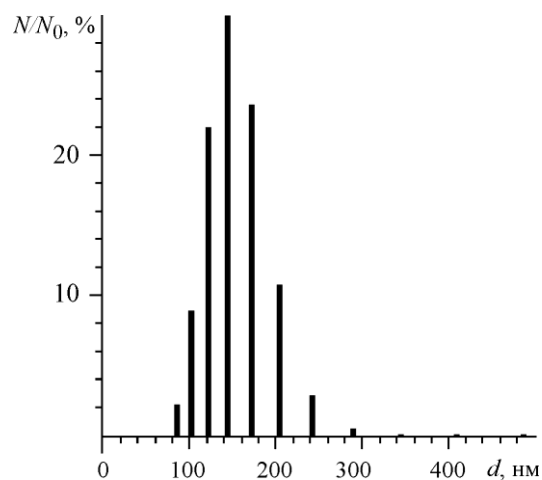


Рис.4. Распределение числа формируемых частиц по размерам

**Заключение.** Облучение поверхности материалов фемтосекундными лазерными импульсами позволяет получать наноразмерные структуры как на поверхности материала (линейно-периодический рельеф), так и в виде коллоидных растворов с возможностью контролирования размера отдельных элементов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект №14.Z50.31.0015) и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-42-73018716) в рамках государственного задания Минобрнауки России.*

### Литература

1. *Young J.F., Preston J.S., Van Driel H.M., Sipe J.E.* Laser-induced periodic surface structure // Physical Review B. – 1983. – P. 1155–1172.
2. Интерференция поверхностных электромагнитных волн и периодические структуры, образующиеся при воздействии интенсивного света на поверхность полупроводника / *В.В. Баженов, А.М. Бонч-Бруевич, М.Н. Либенсон и др.* // ПЖТФ. – 1984. – Т.10. – №24. – С. 1520–1527.
3. *Vorobyev A.Y., Chunlei Guo.* Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // J. of Appl. Phys. – 2015. – Vol. 117. – N. 033103. – P. 1–5.
4. *Макаров Г.Н.* Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии // УФН. – 2013. – Т. 183. – №7. – С. 673–718.
5. *Федянин Д.Ю., Арсенин А.В., Лейман В.Г., Гладун А.Д.* Поверхностные плазмон-поляритоны с отрицательной и нулевой групповыми скоростями, распространяющиеся по тонким металлическим пленкам // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 9. – №8. – С. 745–750.
6. Фемтосекундная лазерная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана / *Е.В. Голосов, В.И. Емельянов, А.А. Ионин и др.* // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 90. – Вып.2. – С. 116–120.
7. Особенности структурирования поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами высокой мощности / *И.О. Явтушенко, М.С. Явтушенко, И.О. Золотовский и др.* // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – Вып.15. – С. 60–68.
8. *Малкин В.С., Малкин Р.С.* Основы взаимодействия ультракороткого лазерного излучения с конденсированными средами. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – 236 с.

Статья поступила  
20 мая 2016 г.

**Костишко Борис Борисович** – аспирант, младший научный сотрудник Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета (НИТИ УлГУ). *Область научных интересов:* нанотехнологии, атомно-силовая и электронная микроскопия.

**Светухин Вячеслав Викторович** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИТИ УлГУ. *Область научных интересов:* радиационные технологии, термодинамика дефектообразования в металлах и полупроводниках.

**Явтушенко Игорь Олегович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИТИ УлГУ. *Область научных интересов:* материаловедение, лазерное наноструктурирование материалов, композиционные материалы, электроплазменная обработка металлов и полупроводников. **E-mail:** yavigor@mail.ru