

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

*Под редакцией доктора технических наук, профессора В. П. Вейко  
и доктора технических наук, профессора Е. Б. Яковлева*

### СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
<b>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>	
Резунков Ю. А. Лазерная реактивная тяга.....	7
<b>ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА</b>	
Маркин Е. П., Лозовой А. К., Смирнов С. Н., Яхонтов Ю. Г. Опыт промышленного применения лазерных технологических комплексов на базе волоконных генераторов .....	13
Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д., Голошевский Н. В. Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки.....	17
Кочетов А. Д., Петров А. А. Лазерная гибка тонколистовых деталей импульсным излучением .....	22
<b>ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ</b>	
Хайдуков Е. В., Храмова О. Д., Рочева В. В., Зуев Д. А., Новодворский О. А., Лотин А. А., Паршина Л. С., Поройков А. Ю., Тимофеев М. А., Унтила Г. Г. Лазерное текстурирование кремния для создания солнечных элементов.....	26
Агеев Э. И., Вейко В. П., Киеу К. К. Модификация фоточувствительной стеклокерамики „Фотуран“ ультракороткими лазерными импульсами.....	32
Сурменко Е. Л., Попов И. А., Соколова Т. Н. Использование лазерной эмиссионной спектроскопии для анализа распределения химических элементов в лазерных сварных швах .....	37
Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М., Велесевич И. В., Зильбершмидт М. Г., Лаптев В. Б., Шведов И. М. Образование периодических структур на поверхности силикатов при воздействии излучения СО <sub>2</sub> -лазера.....	42

<b>Вейко В. П., Горный С. Г., Одинцова Г. В., Патров М. И., Юдин К. В.</b> Формирование многоцветного изображения на поверхности металлов при ее лазерном окислении .....	47
<b>ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И РЕСТАВРАЦИИ</b>	
<b>Новиков Б. Ю., Чикалев Ю. В., Шахно Е. А.</b> Очистка объектов городской архитектуры от граффити .....	53
<b>Самохвалов А. А., Ярчук М. В.</b> Лазерная очистка растрованных полиграфических валов .....	56
<b>Вейко В. П., Петров А. А., Мазнев А. С., Евстафьев А. М., Калинина А. А.</b> Лазерная очистка рельсового пути.....	61
<b>Вейко В. П., Волков С. А., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н.</b> О возможности спектроскопического контроля процесса лазерной очистки .....	65
<b>Малкиель И. К.</b> Применение лазерных технологий при реставрации предметов искусства.....	69
<b>ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ</b>	
<b>Волынский М. А., Воробьева Е. А., Гуров И. П., Маргарянц Н. Б.</b> Бесконтактный контроль микрообъектов методами интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии.....	75
<b>Кособукин В. А.</b> Ближнепольная микроскопия на основе линейного нанозонда.....	82
SUMMARY ( <i>перевод Ю. И. Копилевича</i> ).....	89

## THEMATIC ISSUE

*By Edition of V. P. Veiko, Doctor of Technical Science, Professor,  
and E. B. Yakovlev, Doctor of Technical Science, Professor*

## CONTENTS

PREFACE .....	5
<b>PROMISING LASER TECHNOLOGIES</b>	
Rezunkov Yu. A. High Power Laser Propulsion.....	7
<b>LASER-ASSISTED PROCESSING</b>	
Markin E. P., Lozovoy A. K., Smirnov S. N., Yakhontov Yu. G. Practice of Commercial Application of Laser Technological Complexes on the Base of Fiber Generators .....	13
Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D., Goloshevsky N. V. An Expert System for Laser Microprocessing Mode Optimization.....	17
Kochetov A. D., Petrov A. A. Pulsed Laser Assisted Forming of Thin Sheet Metal .....	22
<b>LASER-ASSISTED MODIFICATION AND STRUCTURING OF SURFACE</b>	
Khaydukov E. V., Khramova O. D., Rocheva V. V., Zuev D. A., Novodvorsky O. A., Lotin A. A., Parshina L. S., Poroykov A. Yu., Timofeev M. A., Untila G. G. Laser-Induced Silicon Surface Structuring for Solar Cell Application .....	26
Ageev E. I., Veiko V. P., Kieu K. Q. Modification of Photosensitive Glass-Ceramic “FOTURAN” with Ultrashort Laser Pulses .....	32
Surmenko E. L., Popov I. A., Sokolova T. N. Redistribution of Elements in Steel Laser Weld Joint Studied with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy.....	37
Mukhamedgalieva A. F., Bondar A. M., Velevich I. V., Zilbershmidt M. G., Laptev V. B., Shvedov I. M. Formation of Periodic Structures at the Surface of Silicate under Resonant Action of CO <sub>2</sub> Laser Irradiation.....	42
Veiko V. P., Gorny S. G., Odintsova G. V., Patrov M. I., Yudin K. V. Color Image Formation at Laser Oxidation of Metals.....	47
<b>LASER TECHNOLOGIES FOR CLEANING AND ARTWORKS RESTORATION</b>	
Novikov B. Yu., Chikhalev Yu. V., Shakhno E. A. Laser-Assisted Graffiti Paints Removal.....	53
Samokhvalov A. A., Yarchuk M. V. Laser Cleaning of Screened Printing Rolls .....	56
Veiko V. P., Petrov A.A., Maznev A. S., Evstafiev A. M., Kalinina A. A. Laser-Assisted Rail Cleaning to Enhance the Friction Coefficient.....	61

<b>Veiko V. P., Volkov S. A., Mutin T. Yu., Smirnov V. N.</b> On Feasibility of Spectroscopic Control over Laser Cleaning Process .....	65
<b>Malkiel I. K.</b> Application of Laser Technologies for Artworks Restoration .....	69
<b>OPTICAL CONTROL METHODS</b>	
<b>Volynsky M. A., Vorobieva E. A., Gurov I. P., Margariantz N. B.</b> Remote Testing of Microlens with the Use of Low-Coherence Interferometry and Optical Coherence Tomography .....	75
<b>Kosobukin V. A.</b> Near-Field Microscopy with a Linear Nanoprobe Supporting Plasmons...	82
SUMMARY .....	89

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Области применения лазерных микро- и нанотехнологий постоянно расширяются, включая в себя новые направления, такие как фотоника (см. тематический выпуск журнала „Известия вузов. Приборостроение“, 2004, № 10), микроматериаловедение (см. „Известия вузов. Приборостроение“, 2006, № 9 и 2008, № 4) и нанотехнологии.

С 5 по 8 июля 2010 г. в Санкт-Петербурге прошла традиционная Международная конференция „Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий“. В рамках этой конференции состоялись научные школы „Фотофизика наноматериалов и наносистем“, „Взаимодействие излучения терагерцового диапазона с веществом“, „Лазерная очистка в промышленности и искусстве“. Некоторые доклады ведущих специалистов были включены в программу школы молодых ученых и специалистов.

На конференции было представлено 184 доклада (74 приглашенных устных и 110 стендовых) от ученых из 22 стран мира, в том числе США, Германии, Франции, Японии, Италии, Великобритании, Украины, Белоруссии, Литвы, Латвии, Узбекистана, России и др.

Все доклады были сгруппированы по сессиям:

- взаимодействие лазерного излучения с веществом,
- применение лазеров в микро- и нанотехнологиях (в микромеханике, нанофотонике, микро- и наноэлектронике).

Материалы конференции готовятся к публикации на английском языке в выпуске „Proceedings of the SPIE“, часть докладов будет опубликована в „Оптическом журнале“. Для издания в настоящем выпуске журнала были отобраны доклады русскоязычных участников конференции, в которых затронуты основные рассмотренные на конференции темы.

Надеемся, что читатели выпуска получат некоторые представления об уровне развития лазерных микро- и нанотехнологий в России.

*Заведующий кафедрой лазерных технологий  
Санкт-Петербургского государственного университета  
информационных технологий, механики и оптики  
доктор технических наук, профессор В. П. ВЕЙКО,  
доктор технических наук, профессор Е. Б. ЯКОВЛЕВ*

## PREFACE

The areas of laser micro- and nanotechnologies applications are constantly expanding, including novel fields such as photonics, material science, nanotechnologies, etc. The two last fields attract a special interest now in view of possibility to create new materials and components in a single process with laser technologies.

All above mentioned subjects were presented at annual International Conference “Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies” (FLAMN-10), which took place on July 5—8, 2010 in St. Petersburg. At that time, FLAMN-10 Program included a number of associated events such as:

- Workshop “Photophysics of Nano-Scale Systems”;
- Workshop “Terahertz Radiation Interaction with a Matter”;
- Workshop “Laser Cleaning and Artworks Conservation”;
- Seminar “Industrial Applications of Fiber Lasers”;
- Seminar “Computer Simulations of Laser Technologies”;
- The school for junior scientists and engineers.

During the Conference 184 papers (74 invited and 110 posters) were presented by scientists from about 20 countries including the USA, Germany, France, Japan, Italy, UK, Ukraine, Belarus, Lithuania, Latvia, Uzbekistan, Russia, etc.

FLAMN-10 subjects included two main sections:

- Laser-Matter Interaction,
- Laser-Assisted Micro-and Nanotechnologies.

A full collection of papers presented at FLAMN-10 Conference will be published soon in “Proceedings of the SPIE”, 2008, vol. 6985. For publication in this special issue, papers by Russian participants of the above-mentioned Conference have been selected.

The editors hope that readers of the issue will have an impression of laser microtechnology in Russia.

The editors express their gratitude to all the institutions and persons who have contributed to organizing, supporting and holding the Conference and this issue especially.

*Doctor of Technical Science, Professor V. P. VEIKO,  
Doctor of Technical Science, Professor E. B. YAKOVLEV*

---

---

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

---

---

УДК 621.378.33, 533.6.011.72

Ю. А. РЕЗУНКОВ

## ЛАЗЕРНАЯ РЕАКТИВНАЯ ТЯГА

Исследуются условия развития новых транспортных систем для запуска космических аппаратов с использованием излучения мощных лазеров. На основе анализа различных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом решается задача повышения эффективности лазерной тяги.

*Ключевые слова:* лазерная тяга, лазерный пробой, лазерная абляция, удельный импульс, удельный импульс реактивной отдачи.

**Введение.** Применение лазерной тяги — одно из перспективных направлений разработки аэрокосмических транспортных систем [1, 2]. Лазерная реактивная тяга — элемент концепции использования энергии направленного излучения для передвижения в воздушном и космическом пространстве. При значительном количестве запусков аппаратов на околоземную орбиту (свыше 1000 в год) лазерная система может оказаться экономически выгодной [3]. Для запуска аппарата массой 100 кг на околоземную орбиту потребуется мощность лазерного излучения ~ 100 МВт, поэтому развитие лазерной реактивной тяги связано с разработкой мощных лазеров и исследованиями взаимодействия лазерного излучения с различными рабочими средами для лазерного реактивного двигателя (ЛРД).

Очевидно, что эффективность применения лазерной тяги будет зависеть от решения таких проблем, как:

- создание ЛРД с высокими удельными характеристиками тяги [4];
- разработка мощных лазеров с малой (дифракционной) расходимостью излучения;
- обеспечение точной доставки лазерной энергии к летательному аппарату через атмосферу Земли [5].

В настоящей работе рассматривается первая из приведенных проблем, ее решение должно дать ответ на вопрос, какой механизм формирования лазерной тяги может быть использован для создания высокоэффективных лазерных реактивных двигателей. При разработке ЛРД с максимальными удельными характеристиками тяги требуется достижение КПД двигателя на уровне 70—80 %. Такие ЛРД должны позволить уменьшить требуемую лазерную мощность и снизить расход рабочего вещества.

**Лазерные воздушно-реактивные двигатели.** Эффективность создания тяги в ЛРД характеризуется удельным импульсом реактивной отдачи, который определяется как отношение величины тяги  $S$  двигателя к мощности лазерного излучения  $P$ , т.е.  $C_m = S/P$  (Н/Вт) [6]. Эффективность расхода рабочего вещества характеризуется удельным импульсом  $I$ , равным отношению величины тяги к секунднему расходу топлива  $s$ :  $I = S/sg = v/g$  (с), где  $v$  — средняя скорость потока в реактивной струе,  $g$  — ускорение свободного падения. Эти параметры позволяют оценить КПД  $\eta$  двигателя [5]:

$$\eta = C_m I g / 2. \quad (1)$$

Перспективными для использования в аэрокосмических транспортных тренажерах можно считать такие ЛРД, у которых  $C_m > 10^{-3}$  Н/Вт и  $I_{sp} \sim 10^3$  с. В лазерных воздушно-реактивных двигателях (ЛВРД) в качестве рабочего вещества используется атмосферный воздух. Наиболее полное объяснение механизма формирования тяги в ЛВРД дано в работе [6]. Максимальные значения  $C_m = (40—50) \cdot 10^{-5}$  Н/Вт наблюдались для сопла в виде конуса и параболоида вращения при достаточно широком изменении энергии в импульсе ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера.

Аналогичные данные по  $C$  были получены и другими авторами. В частности, в [7] с использованием электроионизационного  $\text{CO}_2$ -лазера с длительностью импульса 10 мкс —  $C_m \sim (20—30) \cdot 10^{-5}$  Н/Вт в параболическом сопле. При этом максимальное значение  $C_m$  ( $30 \cdot 10^{-5}$  Н/Вт) достигалось при увеличении длины сопла с помощью цилиндрической насадки. Использование насадки на параболическое или другое сопло дает в среднем увеличение  $C_m$  на 20—30 % в зависимости от ее длины и отношения  $R/R_0$  ( $R$  — характерный геометрический параметр реактивного сопла,  $R_0$  — „динамический“ радиус локального взрыва).

Одной из основных проблем использования ЛВРД является малая эффективность вклада энергии лазерного импульса в рабочую среду. Как показали эксперименты [8], эффективность преобразования энергии лазерного импульса в тепловую энергию рабочего газа  $\alpha$  не зависит от энергии лазерного импульса и остается на уровне 35 % при изменении энергии в диапазоне  $W = 20—100$  Дж при атмосферном давлении газа. Это справедливо как для азота, так и для воздуха, при понижении давления газа менее 0,3 атм в чистом азоте происходит плавное уменьшение  $\alpha$ . На рис. 1 приведена зависимость эффективности преобразования  $\alpha$  от давления азота при взаимодействии импульса излучения Nd-лазера с азотом.

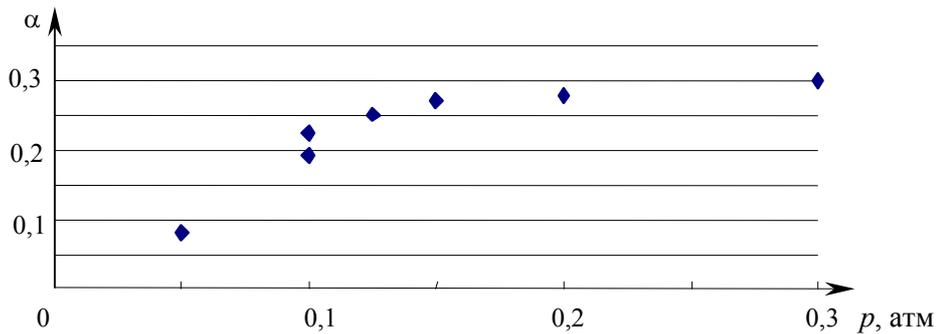


Рис. 1

Теоретический анализ полученных экспериментальных данных с использованием модели многократно ионизованной плазмы оптического пробоя газов [9] подтвердил, что при интенсивности лазерного излучения  $q \sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, когда взаимодействие излучения с плазмой определяется механизмами многофотонной ионизации и обратнотормозного поглощения, величина  $\alpha$  не зависит от газа (азот, воздух) и полностью определяется температурой плазмы и начальным давлением газа.

Поскольку полученная эффективность вклада лазерной энергии в плазму является явно низкой для получения высокого КПД лазерных двигателей, создание реактивной тяги на основе использования только ЛВРД не представляется перспективным.

**Лазерная тяга на основе абляции твердых материалов.** Способы формирования лазерной реактивной тяги на основе лазерной абляции следующие:

- прямая лазерная абляция, когда тяга формируется лишь за счет давления паров испарившегося материала [10];
- комбинированная абляция, когда для формирования тяги дополнительно используется энергия ударной волны, возникающей при оптическом пробое паров испарившегося материала [11];
- лазерная абляция в структурированных материалах [12].

Величина удельного импульса реактивной отдачи  $C_m$  при прямой абляции зависит от материала мишени и параметров лазерного импульса. Причем с увеличением интенсивности лазерного излучения и при превышении пороговой интенсивности испарения значения  $C_m$  возрастает и достигает максимума при интенсивности лазерного импульса, близкой к порогу пробоя паров испарившегося материала [11]. Предельное значение  $C_m$  достигается при большой длительности лазерного импульса ( $\sim 1$  мс) и слабо зависит от длины волны:

$$C_{m\max} = \frac{A}{L} \left( \frac{\gamma T_{\text{кип}}}{m} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь  $A$  — коэффициент поглощения лазерного излучения материалом на стадии его испарения,  $L$  — удельная теплота парообразования, Дж/г,  $\gamma$  — эффективный показатель адиабаты испарившегося вещества,  $m$  — масса испарившегося вещества. Из (2) следует, что для получения максимального  $C_{m\max}$  необходимо выбирать материал с максимальным отношением  $\gamma T_{\text{кип}}/(L^2 m)$  и обеспечить максимальное значение  $A$ . Расчеты, проведенные по данной формуле, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными значениями  $C_m$ , например:  $C_{m\max} = 6 \cdot 10^{-5}$  Н·с/Дж — для алюминия и  $10^{-4}$  — для меди [10].

В [13] на основе анализа результатов экспериментов показано, что при интенсивности излучения, превышающей порог пробоя паров материала, с хорошей точностью выполняется следующее автомодельное соотношение:

$$C_m = b(q\lambda\tau^{1/2})^j. \quad (3)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны излучения, см,  $\tau$  — длительность импульса, с. Для алюминиевых сплавов, например,  $b=5,6$ , а для С—Н-материалов  $b=6,5$ ; при этом  $j = -0,3$  для обоих типов материалов. Данное соотношение справедливо в широком диапазоне изменения интенсивности лазерного излучения от 3 МВт/см<sup>2</sup> до 70 ГВт/см<sup>2</sup>, длительности импульса от 500 пс до 1,5 мс, длины волны излучения — в пределах 0,248—10,6 мкм.

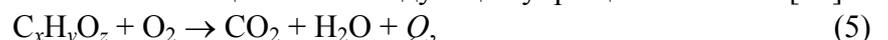
Одним из возможных способов повышения  $C_m$  является использование реактивного импульса ударной волны, возникающей вблизи поверхности материала в газовой среде при лазерном пробое паров испарившегося материала — комбинированный механизм формирования тяги [13]:

$$C_m = (10)^{5/3} a_3 (\rho 10^9 / q)^{1/3} \text{ дин} \cdot \text{с/Дж}, \quad (4)$$

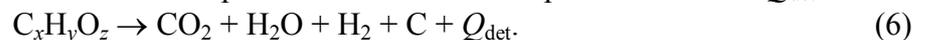
где  $a = ((\gamma+1)/2\gamma)^{2\gamma/(\gamma-1)}$ ,  $\rho$  — плотность окружающего газа. Согласно (4), величина  $C_m$  определяется только свойствами газовой среды и интенсивностью лазерного излучения и не зависит от материала мишени и длины волны излучения, однако и в этом случае  $C_m \approx 10^{-5}$  Н/Вт.

**Лазерно-химические реактивные двигатели.** Значительного улучшения характеристик тяги в ЛРД [14] можно достичь при использовании веществ СНО-состава (полимеров), в которых лазерный импульс инициирует химические реакции, протекающие с дополнительным выделением энергии.

В работе [15] рассчитаны основные термохимические параметры (удельная теплота сгорания, детонации и догорания продуктов детонации, коэффициенты  $N$  догорания продуктов детонации в кислороде атмосферного воздуха) ряда полимерных и поликристаллических веществ СНО-состава с отрицательным кислородным балансом. Физико-химическая модель процесса детонации СНО-веществ, инициированного лазерным импульсом, включала в себя испарение и термическое разложение СНО-вещества по следующей упрощенной схеме [16]:



где  $Q$  — удельная теплота сгорания, которая выделяется при протекании двух последовательных процессов  $Q_{\text{det}}$  и  $NQ_d$ . Первый из них, который, собственно, и инициируется лазерным импульсом, есть реакция детонации. При этом выделяется энергия детонации  $Q_{\text{det}}$ :



Второй процесс — реакция догорания не полностью окислившихся продуктов детонации вещества, при которой выделяется энергия догорания  $Q_d$



Для определения влияния свойств вещества на характеристики тяги ЛРД использовался параметр „коэффициент эффективности“  $K$ , который на основе энергетического баланса можно записать в виде

$$K = \sqrt{(1 + m/M)(1 + mQ/\alpha W)}, \quad (8)$$

где  $M$  — масса воздуха в объеме сопла двигателя. В качестве полимерных рабочих веществ были исследованы полиоксиметилен (polyoxymethylene, делрин)  $[-CH_2O-]_n$ , поливинилхлорид (polyvinylchloride)  $[-CH_2CHCl-]_n$ , полистирол (polystyrene)  $[-C_8H_8-]_n$  и поликарбонат (polycarbonate)  $[-C_{16}H_{14}O_3-]_n$ . Первые два относятся к линейным алифатическим полимерам, термическое разложение (разрыв цепи) которых происходит при невысоких температурах ( $\sim 200$  °С) [16]. Два следующих полимера в своем составе содержат бензольные кольца, которые обладают свойством поглощать энергию лазерного излучения, перераспределяя ее по связям бензольного кольца, повышая температуру разложения полимера ( $\sim 350$  °С).

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости  $C_m$  от  $K$  для полимерных (1) и поликристаллических (2) рабочих СНО-веществ.

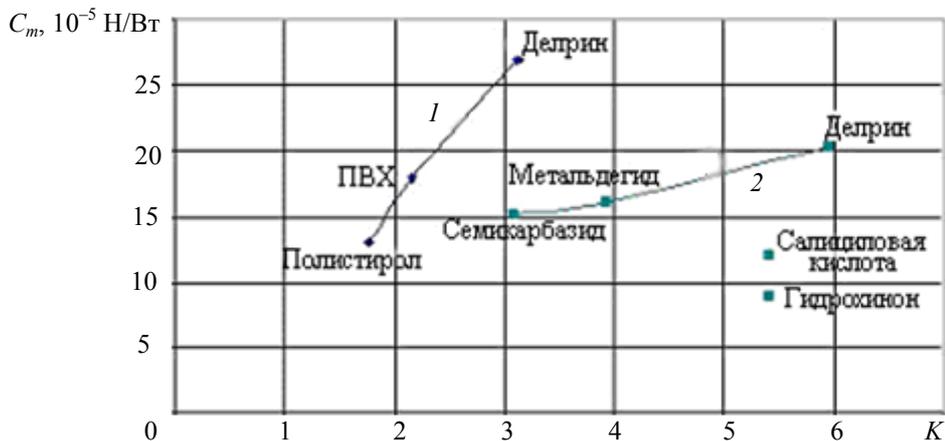


Рис. 2

Особенность проведенных экспериментов заключалась в том, что геометрические параметры области взаимодействия лазерного импульса с различными материалами подбирались так, чтобы сохранить постоянным значение соотношения  $(q\lambda\sqrt{\tau})$ , см. (3). В экспериментах как с  $CO_2$ -лазером, так и с Nd-лазером,  $q\lambda\sqrt{\tau} \sim 10$  Вт $\sqrt{с}$ /см. Интенсивность излучения на поверхности образца варьировалась в пределах  $10^8$ — $10^9$  Вт/см $^2$  для  $\lambda = 1,06$  мкм и  $10^5$ — $10^6$  — для 10,6 мкм. При этом в экспериментах с неодимовым лазером пятно облучения на исследуемом образце представляло собой круг диаметром 11 мм, т.е. за время воздействия лазерного импульса на образец все процессы взаимодействия можно было считать квазиодномерными.

Рассматривая взаимодействие лазерного импульса с твердыми веществами СНО-состава в приближении абляционной модели [13] и предполагая, что время детонации и догорания продуктов детонации много меньше характерного газодинамического времени разлета плазмы, для давления паров испарившегося материала вблизи поверхности образца можем записать:

$$p = [(1 + \gamma M^2)] \rho c^2 + \rho c Q, \quad (9)$$

где  $p$  и  $\rho$  — давление и плотность паров испарившегося материала,  $c$  — скорость звука. С учетом скорости абляции  $v = \rho c = B(q/\lambda\sqrt{\tau})^{1/2}$  имеем:

$$p = Aq^{3/4}(\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4} + B(q/\lambda\sqrt{\tau})^{1/2} Q, \quad (10)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  зависят только от состава вещества. Тогда по определению  $C_m$  получаем:

$$C_m = A(q\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4} + B(q\lambda\sqrt{\tau})^{-1/2}Q \quad (11)$$

и

$$K = 1 + (B/AQ)(q\lambda\sqrt{\tau})^{-1/4}. \quad (12)$$

Как следует из (12), коэффициент  $K$  зависит как от состава вещества, так и от характеристик лазерного импульса. Этот параметр можно использовать для прогнозирования характеристик тяги ЛРД с энергетическими рабочими веществами на другие типы лазеров.

Использование полимера делрина в качестве рабочего вещества в макете ЛРД в [16] позволило получить  $C_m \sim 10^{-3}$  Н/Вт.

**Заключение.** Лазерно-химические реактивные двигатели, пожалуй, являются наиболее перспективными для использования в лазерных системах реактивной тяги. В качестве рабочего вещества ЛРД можно использовать полимерные материалы, которые безопасны в эксплуатации. Однако для повышения КПД двигателя до 70 % потребуются создание такого рабочего вещества, которое должно иметь сбалансированный состав окислителя (в нашем случае — кислород) и горючего (углерод и водород). Следует заметить, что сбалансированный состав, когда окислитель полностью окисляет горючие компоненты топливного вещества (нулевой кислородный баланс), автоматически приводит к тому, что это вещество будет являться взрывчатым.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Myrabo L. N., Lewis J. S.* Lightcraft. Flight handbook. Canada: Apogee Books, 2009. 284 p.
2. *Черток Б. Е.* Космонавтика XXI века. Попытка прогноза развития до 2101 года. М.: Изд-во РТСофт, 2010.
3. *Larson C. W., Mead F. B. jr., Knecht S. D.* Laser propulsion and the constant momentum mission. Beamed Energy Propulsion // AIP Conf. Proc. 2003. Vol. 702. P. 216—225.
4. *Резунков Ю. А.* Лазерные системы реактивной тяги. Обзор исследований // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 8. С. 20—32.
5. *Игнатьев А. Б.* Вопросы интеграции мощных лазерных источников со средствами формирования, ориентирования и точного наведения луча. М.: МИРЭА, 2008. 72 с.
6. *Агеев В. П., Барчуков А. И.* и др. Лазерный воздушно-реактивный двигатель // Квант. электрон. 1977. Т. 4, № 12. С. 2501—2513.
7. *Schall W.O., Eckel H.-A., Mayerhofer W.* et al. Comparative lightcraft impulse measurements // Proc. AIP. 2004. Vol. 766. P. 423—432.
8. *Агейчик А. А., Борисов М. Ф., Егоров М. С., Лаиков В. А., Машек И. Ч., Резунков Ю. А., Савельева В. П., Сафронов А. Л., Степанов В. В.* Эффективность преобразования лазерной энергии в тепловую энергию газа применительно к лазерным двигателям // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 4. С. 65—71.
9. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. М.: Физматгиз, 1963. 800 с.
10. *Pakhomov A. V., Thompson M. S., Don A. G.* Ablative laser propulsion: a study of specific impulse, thrust and efficiency // AIP Conf. Proc. 2002. Vol. 664. P. 194—205.
11. *Phipps C. R., Seibert D. B., Rouse R. et al.* Very High Coupling Coefficient at Low Laser Fluence with a Structured Target in High-Power Laser Ablation III // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4065. P. 931—938.
12. *Takashi Yabe, Ryou Nakagawa, Masashi Yamaguchi* et al. Simulation and Experiments on Laser Propulsion by Water Cannon Target // 1st Intern. Symp. on Beamed Energy Propulsion. AIP Conf. Proc. 2002. Vol. 664. P. 185—193.
13. *Phipps C.* Laser Ablation Propulsion. Overview // J. Propulsion and Power. 2010. Vol. 26, N 4. P. 609—637.

14. Лиуконен Р. А., Трофименко А. М. Сила реактивной тяги в лазерном двигателе // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, вып. 7. С. 81—85.
15. Агейчик А. А., Ретина Е. В., Резунков Ю. А., Сафронов А. Л. Детонация рабочих веществ СНО-химического состава лазерного реактивного двигателя // ЖТФ. 2009. Т. 54, № 3. С. 402—409.
16. Виноградов Б. А., Перепелкин К. Е., Мещерякова Г. П. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. СПб: Наука, 2006.

**Сведения об авторе**

**Юрий Александрович Резунков**

— д-р техн. наук; Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов, Сосновый Бор, Ленинградская область; E-mail: yuri@sbor.net

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

---

---

# ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

---

---

УДК 621.375.826

Е. П. Маркин, А. К. Лозовой, С. Н. Смирнов, Ю. Г. Яхонтов

## ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ ВОЛОКОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Представлен опыт промышленного применения лазерных технологических комплексов на базе волоконных генераторов при обработке материалов в реальных производственных условиях. Приведены некоторые технологические режимы, показана возможность снижения производственных затрат.

*Ключевые слова:* волоконный лазер, лазерная резка, лазерная термообработка, лазерная обработка материалов, лазерный технологический комплекс.

Новые источники лазерного излучения — волоконные лазеры — привлекают все больший интерес специалистов. Без преувеличения можно сказать, что появление волоконных лазеров ознаменовало прорыв в лазерной физике [1], за несколько лет их выходная мощность была увеличена с нескольких сотен ватт до нескольких десятков киловатт. Волоконный лазер — это компактный источник излучения, отличающийся высоким ресурсом, надежностью и простотой в эксплуатации; он занимает все большую долю рынка источников лазерного излучения.

Волоконные лазеры имеют ряд преимуществ по сравнению с CO<sub>2</sub>-лазерами:

- 1) меньшая длина волны (1,07 мкм), обеспечивающая больший коэффициент поглощения излучения для металлов и соответственно повышение эффективности обработки;
- 2) высокое качество излучения;
- 3) подвод излучения к оптической головке по оптоволокну (отсутствие трассовой оптики);
- 4) высокая энергетическая эффективность (КПД до 30 %);
- 5) отсутствие рабочих газов.
- 6) возможность реализации режима дистанционной обработки;
- 7) минимальные затраты на обслуживание и эксплуатацию.

В России разработкой и созданием технологических комплексов на базе иттербиевых волоконных лазеров занимаются несколько предприятий: ВНИТЭП (Дубна), „НИИ ЭСТО — Лазеры и аппаратура“ ТМ (Зеленоград), НПФ „ТЕТА“ (Москва), Лазерный центр (Санкт-Петербург), НПК „Рapid“ (Воронеж).

Возможности использования мощных волоконных лазеров при обработке материалов достаточно широки. По мере совершенствования элементной базы и снижения стоимости лазерных диодов волоконные генераторы постепенно теснят CO<sub>2</sub>-лазеры в традиционных областях применения лазеров\* (речь не идет о том, что волоконные генераторы полностью заменят CO<sub>2</sub>-лазеры, так как каждый вид технологического оборудования имеет свою нишу).

---

\* Бюллетень ЛАС „Лазер-информ“: 2010. № 3, 4; 2009. № 8; 2008. № 4; 2008. № 1, 2; 2007. № 21, 22; 2007. № 9, 10; 2006. № 5, 6; 2006. № 11; 2006. № 8; 2006. № 11; 2006. № 6; 2003. № 8; 2005. № 13, 14.

Наиболее распространены лазерные системы с волоконными излучателями, позволяющие наносить изображение на поверхность (маркировать) с фотографической точностью [2]. Известны успешные работы по сварке мощными волоконными лазерами [3, 4]. В то же время относительно мало информации о таких важных технологических процессах, как резка листовых и трубных заготовок, термообработка изделий с использованием волоконных лазерных излучателей. Отдельных сведений о возможностях лазеров или максимальной толщине обрабатываемых материалов для конкретного оборудования недостаточно для полного понимания технологического потенциала волоконного лазера. В настоящей статье обобщен опыт эксплуатации волоконных лазеров в составе технологического оборудования в условиях реального производства.

На рис. 1 представлен лазерный технологический комплекс (ЛТК) с волоконным излучателем ЛС-2, основные технические характеристики которого приведены в табл. 1. ЛТК работает в трехсменном режиме и применяется для резки, сварки и термообработки различных материалов.



Рис. 1

Таблица 1

#### Технические характеристики комплекса

Назначение	Резка, сварка, термообработка
Обрабатываемые материалы	Углеродистая, нержавеющая сталь, алюминиевые сплавы, латунь
Тип лазера	Иттербиевый волоконный, модель ЛС-2
Длина волны излучения, мкм	1,065—1,08
Номинальная выходная мощность, кВт	2
Режим работы	Непрерывный, модулируемый
Частота модуляции выходной мощности, кГц	5
Охлаждение	Водяное
Максимальная потребляемая мощность, кВт	10
Оптическая головка	Precitec HP 1,5"
Фокусное расстояние $F$ , мм	127, 190, 254
Максимальное перемещение $X, Y, Z$ , мм	1200, 2000, 600
Скорость перемещения, м/мин	до 4
Точность позиционирования, мм	$\pm 0,1$
Система управления	ЧПУ

В современном малосерийном производстве раскрой металла лазерным излучением позволяет заменить холодную листовую штамповку. Для определения оптимальных технологических режимов использовались листовые заготовки разной толщины и трубы из сплавов трех групп металлов: углеродистая сталь марки Ст.3, нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав АМГ-6.

Технологические режимы определяют следующие параметры: фокусное расстояние линзы, мощность лазерного излучения, диаметр сопла, вид и давление технологического газа, скорость резки. Оптимальным считается режим с наилучшим соотношением производительности и качества обработки (оценивается отсутствие грата, перпендикулярность плоскости реза, наименьшая шероховатость плоскости реза).

Режимы обработки листовых материалов приведены в табл. 2—4 (в качестве технологического газа использовался кислород, фокусное расстояние линзы: табл. 2 — 254, табл. 3, 4 — 190 мм).

Таблица 2

## Материал: Ст. 3

Толщина, мм	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	16
Сопло, $d$ , мм	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,7
Мощность, кВт	0,25	0,55	0,6	1,1	1,2	1,4	1,7	1,7	1,8	2	2
Скорость резки, м/мин	3,0	2,6	3,0	2,6	2,6	2,2	2,1	1,85	1,4	1,1	0,7
Давление технологического газа, атм	1	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,85	0,9	0,9

Таблица 3

## Материал: сталь 12Х18Н10Т

Толщина, мм	1,5	2	3	4	6
Мощность, кВт	0,65	0,75	0,8	1,0	1,8
Скорость резки, м/мин	3,0	3,0	2,6	1,5	0,8

Таблица 4

## Материал: алюминиевый сплав АМГ-6

Толщина, мм	0,5	2	5	6
Мощность, кВт	0,3	1,4	1,8	1,9
Скорость резки, м/мин	2,5	1,8	0,7	0,45

Резка трубных заготовок любого профиля по технологическим параметрам практически не отличается от резки листовых заготовок. На рис. 2 приведен пример резки трубы из стали 12Х18Н10Т волоконным лазером.



Рис. 2

Резка волоконным лазером (в сравнении с  $\text{CO}_2$ -лазером) характеризуется меньшим размером пятна лазерного излучения в фокальной плоскости и меньшей областью оптимальных

режимов. В целом качество резки металлических материалов волоконным лазером не хуже качества, достигаемого на CO<sub>2</sub>-лазерах фирмы TRUMPF.

Лазерная термообработка (ЛТО) — способ локальной модификации поверхности металлов. Преимущества ЛТО — возможность обработки в труднодоступных местах, минимальный объемный нагрев детали, отсутствие коробления, возможность обработки отдельных участков после сборки конструкции или узла.

Технология ЛТО давно известна, но ее промышленное применение сдерживалось рядом экономических и технологических факторов, среди них отметим низкую энергетическую эффективность и необходимость нанесения поглощающих излучение покрытий при обработке мощными CO<sub>2</sub>-лазерами. Авторами настоящей статьи были исследованы возможности проведения лазерной термообработки с использованием волоконных лазеров без поглощающих покрытий. Первые результаты оказались обнадеживающими. Лазерной закалке подвергалась резьба буровых труб из сложнолегированной стали. Твердость основы HRC — 26—28. Режим обработки: мощность излучения — 900 Вт; линейная скорость обработки — 2 м/мин; технологический газ — воздух; давление газа — 0,3—0,4 атм.

На рис. 3 проиллюстрировано лазерное упрочнение резьбы буровой трубы: HRC закаленного слоя — 52—54; глубина слоя — 0,5 мм; ширина дорожки — 2 мм.



Рис. 3

Получение положительных результатов стало возможным в том числе благодаря надежности и стабильности лазера ЛС-2 и простоте его эксплуатации.

Производственные затраты на эксплуатацию лазерных комплексов — энергопотребление, расход рабочих газов, как правило, значительны. В условиях производства такие затраты необходимо минимизировать для снижения себестоимости продукции. Это позволит выдерживать жесткую конкуренцию на рынке лазерной обработки материалов. Приведем сравнительные характеристики ЛТК с волоконным лазером и с газовыми лазерами (табл. 5).

Таблица 5

Расход электроэнергии и рабочих газов

Характеристики	ЛТК	ХЕБР-1А	TRUMATIC 3030
Максимальная выходная мощность, кВт	2	1,3	2,6
Суммарная установочная мощность, кВт	25	45	72
Расход рабочих газов, л/ч:			
He	—	85	13
N <sub>2</sub>	—	27	6
CO <sub>2</sub>	—	5	1

Видно, что применение волоконных лазеров позволяет существенно снизить затраты на электроэнергию и рабочие газы. Такие показатели привлекательны для производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дианов Е. М. Волоконная оптика: от систем связи к „нервным системам“ // Вестн. РАН. 2007. Т. 77, № 8. С. 714—718.
2. Валиулин А., Горный С., Гречко Ю., Патров М., Юдин К., Юревич В. Лазерная маркировка материалов // Фотоника. 2007. № 3. С. 16—21.
3. Шиганов И., Холопов А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 6—10.
4. Игнатов А., Криворотов В., Миргородский В. Лазерные сварные соединения из коррозионно-стойких сталей // Фотоника. 2010. № 2. С. 18—21.

#### Сведения об авторах

**Евгений Павлович Маркин**

— ООО „СП «Лазертех»“, Санкт-Петербург; главный инженер

**Александр Константинович Лозовой**

— ООО „СП «Лазертех»“, Санкт-Петербург; главный технолог;  
E-mail: lozovoy.58@mail.ru

**Сергей Николаевич Смирнов**

— ООО „СП «Лазертех»“, Санкт-Петербург; генеральный директор;  
E-mail: lasertex@mail.ru

**Юрий Генрихович Яхонтов**

— ООО „СП «Лазертех»“, Санкт-Петербург; начальник НТО;  
E-mail: yuri84@yandex.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

УДК 681.518.2, 621.373.826, 681.518.3

В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, Е. Д. БУЛУШЕВ, Н. В. ГОЛОШЕВСКИЙ

### ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Предложена экспертная система принятия решений для оптимизации режимов лазерной микрообработки. Результаты обработки оцениваются с помощью электронных датчиков.

**Ключевые слова:** лазерная микрообработка, система поддержки принятия решений, экспертные системы, составные сканаторы, оптические сканеры, системы технического зрения.

Большинство лазерных технологий микрообработки — резка, сверление, сварка, фрезерование — опираются на методы локального воздействия мощного излучения на обрабатываемый материал. Возникающие при этом термические, термохимические, гидродинамические процессы нестационарны и плохо поддаются математическому моделированию. Кроме того, в процессе лазерной микрообработки в материалах происходят фазовые превращения, изменяются их структура и кристаллическая решетка, возникают внутренние напряжения и т.д. В области лазерного воздействия формируются участки, содержащие продукты взаимодействия материала и окружающей среды, с характеристиками, отличающимися от характеристик основного объема вещества [1]. Также на процесс физико-химического взаимодействия излучения с веществом влияют параметры сканирующей системы (точность, быстродействие). Например, недостаточная скорость перемещения лазерного луча может приводить к нежелательному обгоранию поверхности либо ее деформации вследствие локального перегрева. Сложность

настройки лазерной системы под конкретную технологическую задачу обусловлена многообразием обрабатываемых материалов, различными требованиями к характеру обработки и ее результатам, а также регулируемые параметрами лазерных систем.

Известные программно-аппаратные решения, позволяющие автоматизировать процесс настройки оборудования, можно условно разделить на три типа.

1. Экспертные системы, или системы поддержки принятия решения (СППР), упрощающие настройку режима обработки до начала эксперимента [2].

2. Системы управления, позволяющие корректировать режим лазерной обработки, основываясь на оценке оператором результатов предыдущих экспериментов по определенной совокупности параметров [3].

3. Системы контроля, анализирующие взаимодействие лазерного луча с материалом в режиме реального времени и автоматически корректирующие режим лазерной обработки [4, 5].

Однако ни одно из перечисленных решений в настоящее время не позволяет точно определить параметры лазерной обработки исходя из компьютерных моделей и учета свойств материала.

Объединив возможности систем первого и второго типа, можно обеспечить автоматическую работу созданной системы. В полученной системе поступление информации о качестве лазерной обработки и ее анализ происходят автоматически, с использованием высокоразрешающей системы технического зрения, профилометра и спектрофотометра. Программные средства обеспечивают оперативное пополнение базы данных СППР и оптимизацию режима лазерной обработки на основе накопленной информации. В настоящей работе основное внимание уделяется использованию системы технического зрения при оценке качества обработки и формировании базы СППР.

**Аппаратная реализация.** В Институте автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук создано устройство лазерной микрообработки на основе принципа составного (комплементарного) сканирования, функционально аналогичное устройству, рассмотренному в [2]. В устройство встроены аппаратные средства контроля, обеспечивающие регистрацию изображения зоны обработки (система технического зрения), профиля полученного объекта (микропрофилометр) и спектра излучения при локальной термообработке (спектрофотометр). Структура устройства представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения в системе используется YAG-лазер с длиной волны излучения 1064 нм. Сканирующая головка содержит сканеры СТ 6420 и объектив плоского поля с областью записи 20×20 мм при размере сфокусированного пятна 10 мкм и точности позиционирования лазерного пучка ±3 мкм. Обработка по всему полю 300×300 мм обеспечивается перемещением сканирующей головки с помощью сервоприводов портального механизма, положение которого контролируется оптическими линейками с разрешением 0,5 мкм. Для фокусировки лазерного пучка используется объектный стол.

Система технического зрения позволяет получать двумерное изображение обработанной поверхности материала. Ее аппаратная часть состоит из видеокамеры VEI-545 USB производства ООО „ЭВС“ с телецентрическим 1,7-кратным объективом, что при разрешении фотоматрицы 5 Мпкс дает разрешение в плоскости изображения менее 1 мкм; геометрические искажения изображения, связанные с дисторсией объектива видеокамеры, также не превышают ±1 мкм. Система технического зрения калибруется для взаимной привязки систем координат видеокамеры и оптико-механического модуля лазерной микрообработки. Поле зрения видеокамеры (≈ 2×2 мм) обычно значительно меньше зоны лазерной обработки (100×100 мм и более), поэтому полное изображение синтезируется покадрово. В программной части системы технического зрения реализован алгоритм сшивки кадров, который позволяет получить

изображение структуры, сформированной в процессе микрообработки, с погрешностью не более  $\pm 2$  мкм (в поле 50 мм).

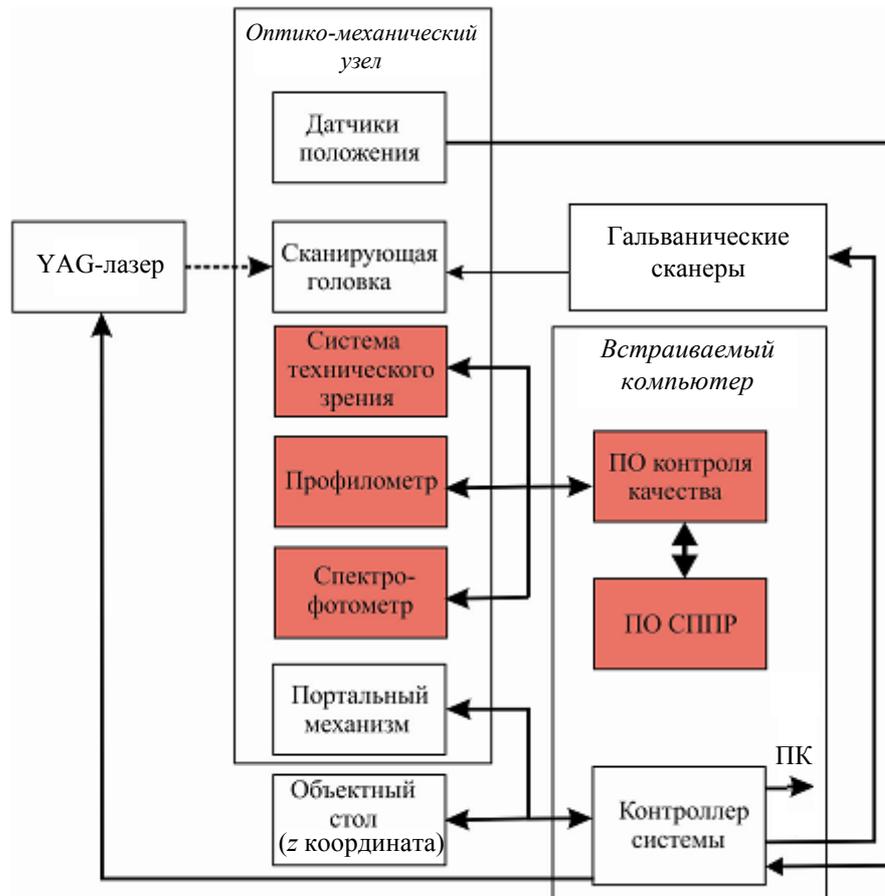


Рис. 1

**Программная реализация.** Программные компоненты системы позволяют решать следующие задачи.

1) Обнаружение и измерение геометрических параметров структуры. Геометрия сформированной структуры может значительно отличаться от требуемой вследствие неполного учета физико-химических процессов, связанных с технологией лазерной обработки, а также вследствие аппаратно-программных ошибок управления лазерным лучом. Для автоматического определения отклонения координат элементов лазерной обработки от заданных предварительно вычисляются геометрические параметры структуры (размеры, форма, расположение), а также выявляются различные геометрические искажения ее составных элементов: разрывы, изгибы, изменения линейных размеров.

2) Оценка качества лазерной микрообработки для определения соответствия качества лазерной обработки требованиям задачи.

3) Сохранение настроек и результатов эксперимента в базу данных экспертной системы.

Используя программное совмещение исходной модели и результатов микрообработки, можно определять зону поиска структуры на изображении. Пользовательский интерфейс позволяет визуально представить результаты совмещения. На рис. 2 приведены: заданный фрагмент области микрообработки (а), структура, полученная с помощью лазерной обработки (б), совмещение изображений (в).

Траектория лазерного луча при формировании структуры на материале определяется в модели. На данном этапе работы реализован алгоритм поиска структур на изображении для

случая незначительного перекрытия контуров (при использовании алгоритма задача обнаружения структур сводится к задаче локализации составляющих контуров).

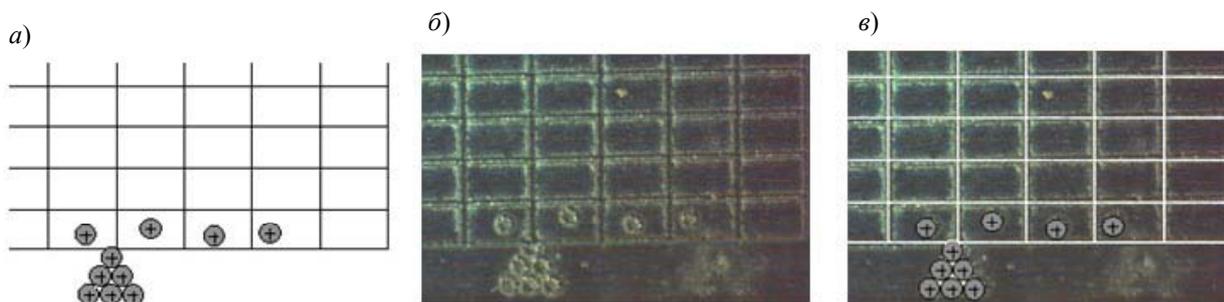


Рис. 2

Использование бестеневого кольцевого освещения в большинстве случаев обуславливает две характеристики: однородность освещения фона и контрастность границ контуров изображения. Первая характеристика определяет возможность сегментирования структуры и фона на изображении по яркости с помощью единого порогового значения для всего изображения. Вторая характеристика позволяет использовать алгоритмы выделения границ для поиска структур. Для уменьшения влияния случайных факторов используется высокочастотная фильтрация. На первом шаге алгоритма изображение пропускается через медианный фильтр (матрица  $10 \times 10$  пикселей). На следующем шаге производится бинаризация изображения; определение порога можно автоматизировать, используя алгоритм Оцу [6]. В дальнейшем для черно-белого изображения производится последовательный поиск контуров (поиск границ, построение скелета и его фильтрация). На рис. 3 приведена обнаруженная структура, состоящая из нескольких контуров.

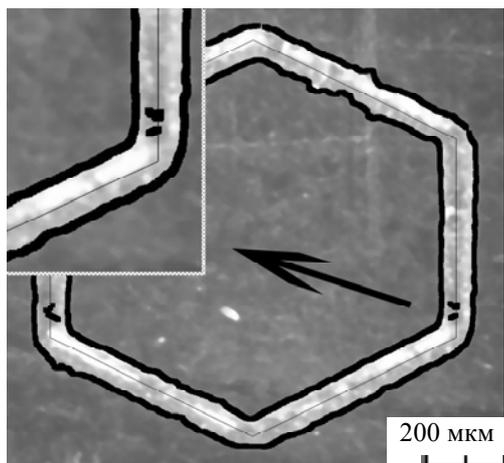


Рис. 3

Автоматически измеряются размеры, положение на плоскости и форма найденных структур. Алгоритмическая точность определения названных величин может быть оценена в 10 точек (размер матрицы медианного фильтра). Далее путем сравнения измеренных параметров с требуемыми значениями оценивается качество лазерной обработки по критериям, сформированным на основе стандартной системы допусков. Вычисляются следующие параметры: ошибки положения, длины, ширины, отклонение границ от прямолинейности, расширение контура. Кроме того, для задач, в которых важна скорость обработки, вычисляется быстродействие. Параметры качества автоматически сохраняются в базу данных экспертной системы и могут быть использованы для оптимизации режима лазерной обработки.

На настоящем этапе работы создано программно-аппаратное решение, позволяющее автоматически оценивать качество лазерной микрообработки путем анализа изображений обработанной поверхности материала. В ходе работы реализован алгоритм поиска структур на изображении с незначительным перекрытием контуров. Алгоритм позволяет находить и оценивать различные геометрические искажения структуры: изменение линейных размеров, разрывы и изгибы контуров. Также реализован программный компонент для сохранения результатов экспериментов в базу данных СППР. Показано, что система технического зрения высокого разрешения позволяет упростить и автоматизировать процесс получения данных для СППР в задачах лазерной микрообработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tünnermann A., Nolte S.* Femtosecond vs. Picosecond Laser Material Processing Challenges in Ultrafast Precision Laser Micromachining of Metals at High Repetition Rates // *LITJ*. 2010. P. 34—38.
2. *Майоров В. С., Майоров С. В., Стернин М. Ю.* Компьютерные системы поддержки принятия решений для лазерных технологических процессов обработки материалов // *Лазерные технологии обработки материалов*. 2009. С. 494—506.
3. Patent 6345205 USA. Support system for laser beam machine, and laser beam machine including the same / *Inamasu, Toru, Aoki, Takayuki*. 1998.
4. *Chen H. B., Brookfield D. J., Williams K., and Steen W. M.* Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors // *Proc. ICALEO '91*. 1991. Vol. 74. P. 113—122.
5. Patent 5659479 USA. Method and apparatus for real-time control of laser processing of materials / *Duley, Walter, Kinsman, Grant*. 1996.
6. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms // *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern.* 1979. Vol. SMC-9. P. 62—66.

**Сведения об авторах****Евгений Дмитриевич Булушев**

— Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кафедра автоматизации физико-технических исследований, Новосибирск; инженер-программист; E-mail: e.d.bulushev@gmail.com

**Виктор Павлович Бессмельцев**

— канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кафедра автоматизации физико-технических исследований, Новосибирск; заведующий лабораторией; E-mail: bessmelt@iae.nsk.su

**Николай Владимирович Голошевский**

— Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кафедра автоматизации физико-технических исследований, Новосибирск; младший научный сотрудник; E-mail: nickolayg@iae.nsk.su

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

А. Д. КОЧЕТОВ, А. А. ПЕТРОВ

## ЛАЗЕРНАЯ ГИБКА ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Проанализирован процесс лазерной гибки тонколистовых изделий. Экспериментально показано, что угол изгиба может быть изменен в широких пределах в зависимости от режима лазерной обработки.

*Ключевые слова:* лазерное формообразование, твердотельный лазер.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению процесса лазерной гибки тонколистовых изделий под действием излучения твердотельного лазера. В работе использовался импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер (средняя мощность до 200 Вт, длительность импульса 0,1—10 мс). Для формирования траектории облучения был использован программируемый шестикоординатный робот Motoman SSF-2000 (рис. 1). В качестве образцов были использованы стальные пластины толщиной от 0,3 до 1,1 мм.



Рис. 1

**Актуальность работы.** Бесконтактное изменение формы детали, вызванное лазерным воздействием, может быть использовано для решения различных задач приборо- и машиностроения. В частности, при формовке деталей различной формы лазерные технологии позволяют в некоторых случаях заменить процесс штамповки и получать необходимую форму детали непосредственно с помощью лазерного облучения [1]. При разработке юстировочных узлов для регулировки положения микрооптических, волоконных, микромеханических и других деталей использование лазера может существенно упростить конструкцию и автоматизировать процесс юстировки [2]. Управляемое деформирование под действием лазерного излучения может быть использовано также при создании микродвигателей для микромеханических систем и решении ряда других задач [1]. Основными достоинствами лазерного формообразования являются бесконтактность, локальность и возможность автоматизации процесса.

**Описание работы.** Рассмотрим кратко механизм возникновения деформаций (пластического формообразования) под действием температурных напряжений. При локальном нагревании некоторой области материала в результате неравномерного теплового расширения в нем возникают термоупругие напряжения. Если напряжения достигают предела текучести, то они приводят к появлению пластических деформаций. По окончании импульса, при остывании среды, деформированная область не принимает исходных размеров и остается в сжатом (по сравнению с исходным) состоянии.

На рис. 2 представлены основные виды деформации вызванные локальным лазерным прогреванием [3].



Рис. 2

В зависимости от глубины прогретого слоя деформирование материала протекает по-разному. При локальном нагреве поверхностного слоя, когда температура поверхности детали много больше температуры обратной стороны,  $T_o \gg T_u$ , тепловое поле приводит к неравномерному тепловому расширению и деформированию преимущественно поверхностных слоев. Этот механизм изгиба получил название поверхностной усадки (near-surface upsetting) [4].

Если во время действия лазерного излучения деталь прогревается равномерно по толщине ( $T_o \approx T_u$ ), тепловое расширение и последующая деформация происходят по всему поперечному сечению детали. В этом случае результатом лазерного воздействия является уменьшение линейных размеров (см. рис. 2), или равномерная усадка (uniform upsetting) [4]. При аналогичном распределении температуры деформирование более тонких пластин происходит иначе, хотя также с уменьшением линейных размеров, по механизму выгибания (buckling) [3].

Технология лазерного формообразования достаточно хорошо известна в мире и активно разрабатывается [1, 5, 6], в России первые публикации по этой теме появились в начале 2000-х гг. [7]. В данной работе исследовался механизм деформирования на основе поверхностной усадки, который приводил к изгибу детали. Угол изгиба измерялся методом оптического рычага. Для регистрации малых перемещений образца в результате деформации под действием лазерного излучения использовалось излучение зондирующего полупроводникового лазера. Измерения проводились следующим образом: на образце закреплялось легкое зеркало или использовалась полированная поверхность образца. Луч полупроводникового лазера, отражаясь от зеркала, падал на экран со шкалой, по измеренному отклонению луча на экране вычислялся угол наклона пластины.

В рамках настоящей работы перемещение лазерного луча по поверхности проводилось как по прямолинейным, так и по сложным траекториям, которые реализовывались с помощью роботизированного комплекса. Лазер работал в импульсном режиме. Движения робота

задавались таким образом, чтобы лазерный луч проходил на 2—3 см за край детали, чтобы избежать перегрева пластины в фазах разгона и торможения.

Активная среда.....	Nd:YAG
Длина волны, мкм.....	1,064
Частота следования импульсов, Гц.....	1—50
Максимальная средняя мощность, Вт.....	200
Длительность импульса, мс.....	0,2—7
Диаметр пятна на образце, мм.....	1

На рис. 3 приведена стальная пластинка с изгибом по дуге.



Рис. 3

Одна из основных задач настоящей работы — выявление закономерностей изгиба при изменении условий эксперимента. В результате серии экспериментов были получены зависимости углов изгиба от числа проходов и длительности импульса и определены режимы лазерной гибки, которые могут быть использованы в последующих исследованиях, направленных на получение упругих деформаций. Были выбраны критерии оптимального режима лазерного формообразования: отсутствие повреждений и следов плавления поверхности, а также линейная зависимость результирующего угла от числа проходов.

На рис. 4 приведена зависимость угла изгиба стальной пластины от числа проходов  $n$  ( $1$  — толщина пластины 0,3,  $2$  — 1,1 мм; скорость сканирования  $V_{ск} = 2,5$  мм/с,  $f = 20$  Гц,  $\tau = 2$  мс); на рис. 5 — зависимость угла изгиба титановой пластины от числа проходов ( $V_{ск} = 2,5$  мм/с,  $f = 20$  Гц,  $\tau = 3,5$  мс).

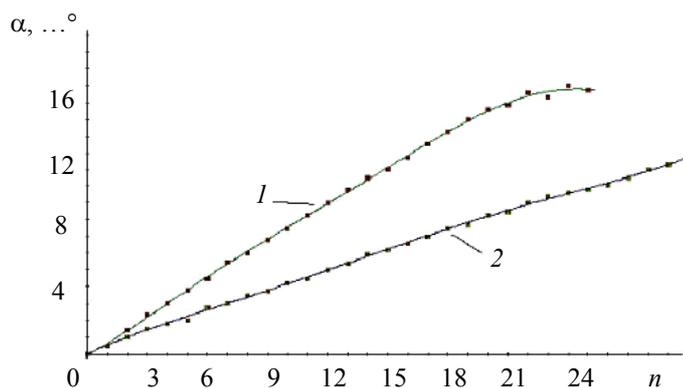


Рис. 4

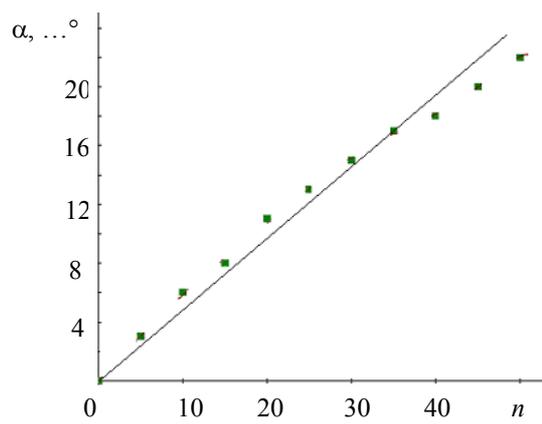


Рис. 5

Погрешность измерения угла составила около 0,5 градуса. Из представленных графиков видно, что при оптимальных режимах лазерного воздействия зависимости близки к линейным, что наиболее удобно при построении технологических процессов. В качестве материалов в работе были использованы сталь марки 12X17, титан ВТ1-00, латунь Л70. Наилучшие результаты были получены на стали 12X17, на латунных образцах угол изгиба не фиксировался, что связано с недостаточным температурным градиентом, возникающим при исследо-

ванных режимах обработки. Увеличение мощности падающего излучения приводило к абляции и повреждению поверхности.

**Заключение.** В работе представлены результаты лазерной гибки тонколистовых деталей из различных материалов при разных режимах облучения. Результаты сравнивались с ранее полученными [2], можно сделать следующие выводы:

— для тонких пластин (глубина прогреваемого слоя порядка толщины пластины) нелинейность изменения угла изгиба значительно сильнее проявляется, чем для толстых (глубина прогреваемого слоя много меньше толщины пластины). Это связано с меньшим различием значений температуры на поверхности и обратной стороне детали. Нелинейность может быть уменьшена путем уменьшения длительности импульса;

— возможен изгиб детали по криволинейной траектории (по дуге), причем при изменении траектории основные зависимости сохраняются;

— толщина пластины является важным параметром при изгибе, так как ограничивает плотность мощности порогом испарения (плавления), что приводит к повреждению поверхности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры ЛТиЭП. Особую благодарность авторы выражают В. П. Вейко за обсуждение результатов, интерес к работе.

Работа поддержана грантом РФФИ № 10-02-00208-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paunoiu V., Squeo E. A., Quadrini F., Gheorghies C., Nicoara D.* Laser Bending of Stainless Steel Sheet Metals // Intern. J. Mat. Forming. 2008. Vol. 1, Suppl. 1. P. 1371—1374.
2. Laser Forming of Thin Metal Components for 2D and 3D Applications Using a High Beam Quality, Low Power Nd:YAG Laser and Rapid Scanning Optics // Intern. Workshop on Thermal Forming. Bremen, 2005.
3. *Muller B.* Virtual Engineering helps to get laser adjustment industrially accepted // 1<sup>st</sup> Intern. Symp. on Laser Precision Microfabrication. Proc. SPIE. 2000. Vol. 4088. P. 164—167.
4. *Hoving W.* Laser adjustment, a novel technique to obtain fast, sub-micron accuracy in mass production // Second Intern. Symp. on Laser Precision Microfabrication. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4426.
5. *Vollertsen F., Geiger M.* Laserstrahljustieren mechatronischer Komponenten. Laser – Von der Wissenschaft zur Anwendung // Strahltechnik. Bremen: BIAS Verlag, 1997. Bd 10. S. 309—320.
6. *Vollertsen F.* An analytical model for laser bending // Lasers in Engineering. 1994. Vol. 2. P. 261—276.
7. *Петров А. А., Вейко В. П.* Пространственное позиционирование микродеталей с помощью лазерного излучения // Микросистемная техника. 2002. № 7. С. 23—27.

#### Сведения об авторах

- Андрей Дмитриевич Кочетов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;  
E-mail: user32-dll@mail.ru
- Андрей Анатольевич Петров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;  
E-mail: petrovandrey79@inbox.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

---

---

# ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

---

---

УДК 539.1.043.3

Е. В. ХАЙДУКОВ, О. Д. ХРАМОВА, В. В. РОЧЕВА, Д. А. ЗУЕВ, О. А. НОВОДВОРСКИЙ,  
А. А. ЛОТИН, Л. С. ПАРШИНА, А. Ю. ПОРОЙКОВ, М. А. ТИМОФЕЕВ, Г. Г. УНТИЛА

## ЛАЗЕРНОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследован процесс возникновения лазерно-индуцированной столбчатой структуры на поверхности *c*-Si и *mc*-Si под действием наносекундных импульсов Nd:YAG-лазера (532 нм) в атмосфере диоксида углерода и в вакууме. Получены образцы текстурированных пластин *mc*-Si размером 20×20 мм с типичной столбчатой структурой (аспектное отношение  $\geq 3$ ) и полным отражением менее 3 %.

*Ключевые слова:* мультикристаллический кремний, лазерное текстурирование, солнечные элементы.

**Введение.** При импульсном лазерном воздействии в условиях незначительного превышения порога абляции материала на его поверхности могут быть сформированы периодические структуры [1—4]. Этот процесс может быть использован для решения актуальной задачи фотоэнергетики: микро- и наноструктурирования поверхности мультикристаллического кремния с целью повышения эффективности солнечных элементов, создаваемых на его основе, за счет снижения потерь, связанных с отражением. Из-за случайной ориентации кремниевых зерен использование стандартных методов текстурирования поверхности *mc*-Si существенно затруднено, поэтому альтернативой достаточно сложным методам химического текстурирования [5—10] может служить лазерная модификация поверхности.

В настоящей работе исследовано изменение морфологии поверхности *c*-Si и *mc*-Si под действием лазерных импульсов (532 нм, 15 нс) в атмосфере диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и в вакууме. Получены образцы текстурированных пластин *mc*-Si размером 20×20 мм со столбчатой структурой с аспектным отношением глубины к ширине  $\geq 3$ . Достигнуто значение коэффициента полного отражения лазерно-текстурированных пластин *mc*-Si ниже 3 % в диапазоне длин волн 300—1000 нм. Проведены исследования влияния последующего химического травления текстурированных пластин на коэффициент полного отражения. На их основе изготовлены солнечные элементы, КПД которых составил 13,7 %.

**Эксперимент.** В качестве подложек использовались полированные пластины *c*-Si (100) и *mc*-Si. Облучение проводилось при плотности энергии от 0,5 до 4 Дж/см<sup>2</sup>. Частота следования импульсов составляла 10 Гц. Излучение лазера было направлено перпендикулярно поверхности, размер облучаемой области оценивался по следу после одного лазерного импульса и составлял 3 мм в диаметре. Количество облучающих импульсов изменялось от 10 до 10<sup>4</sup>. Лазерная модификация проводилась в атмосфере CO<sub>2</sub> и в вакууме. С помощью Nd:YAG-лазера достаточной мощности получена область излучения при фокусировке, превышающая

характерные латеральные размеры формируемых лазерно-индуцированных структур минимум на два порядка. Это позволило при анализе структур полностью исключить влияние неоднородности распределения интенсивности излучения на параметры структуры.

Для текстурирования поверхности *mc-Si* использовались пластины *p*-типа размером 20×20 мм, предназначенные для дальнейшего формирования на них фотоэлектрической структуры солнечного элемента. Текстурирование проводилось в вакуумной камере при остаточном давлении  $10^{-6}$  мм рт. ст. излучением Nd:YAG-лазера при плотности энергии 3,5 Дж/см<sup>2</sup>. Образец размещался на программно управляемой двухкоординатной моторизованной платформе. Текстурирование происходило при сканировании со скоростью 370 мкм/с, латеральный сдвиг между линиями — 720 мкм. Полученные структуры исследовались методами оптической и электронной микроскопии. Полная отражательная способность измерялась на спектрометре ЛОМО-спектр СФ-56 с интегрирующей полусферой, позволяющей учесть не только зеркальное отражение, но и диффузное рассеяние излучения.

**Экспериментальные результаты.** Многоимпульсное лазерное воздействие на поверхность монокристаллического кремния приводит к существенному изменению его морфологии, на поверхности *c-Si* формируются периодические колонны. Плотность энергии лазерного излучения, необходимая для формирования колонн, составляет от 1 до 4 Дж/см<sup>2</sup> в зависимости от дозы облучения и числа накопленных лазерных импульсов. При плотности мощности лазерного излучения 1 Дж/см<sup>2</sup>, что ниже порога абляции, был выявлен режим самосогласованного лазерного текстурирования поверхности, при котором формируется устойчивая столбчатая структура, постепенно заполняющая всю площадь пятна (при этом ее морфология остается неизменной). При плотности энергии 2 Дж/см<sup>2</sup> на поверхности кремния начинает формироваться колонная текстура с повышенной светопоглощающей способностью с аспектным отношением >1. При плотности энергии 3 Дж/см<sup>2</sup> текстура начинает формироваться неоднородно по размеру пятна и при увеличении числа лазерных импульсов становится однородной с аспектным отношением >3 (рис. 1, *a* — 50, *б* — 10 000 импульсов); при 4 Дж/см<sup>2</sup> текстура начинает формироваться в центральной области, а затем достаточно однородно разрастается по всему размеру пятна. При этом наблюдается эффект наклона микроколонн по периферии пятна, задаваемого направлением газодинамического разлета облака испаряемого при абляции материала кремниевой пластины.

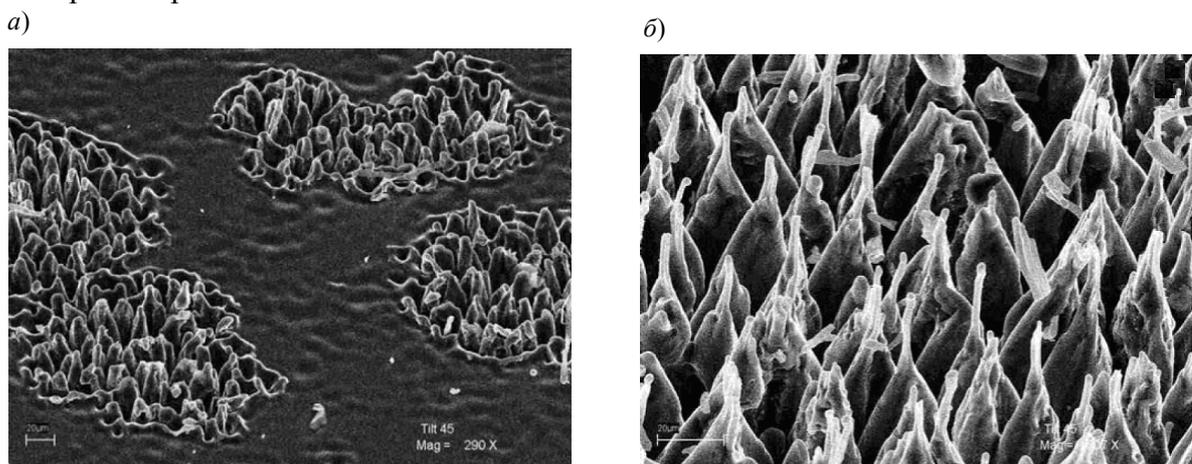


Рис. 1

Для проведения экспериментов в атмосфере газа был выбран диоксид углерода. Использование трехкомпонентной системы (Si, C, O) позволяет с помощью метода рентгенофлуоресцентного анализа получить прямые экспериментальные данные, раскрывающие механизм формирования текстуры. Давление газа в камере могло изменяться от 0 до 1 атм. Анализ морфологии лазерно-индуцированных структур, формируемых в атмосфере диоксида углерода,

показал их отличие от формируемых в вакууме. В целом закономерности их формирования совпадают, но процесс роста структур протекает значительно быстрее. С повышением давления происходит сглаживание структур, что соответствует переходу от режима роста к абляционному режиму. При этом морфология зародышей микроструктур и начальных фаз их развития значительно отличается за счет сильного влияния химических процессов, происходящих на поверхности кремния. В области лазерного воздействия происходит сопровождающееся образованием карбида внедрение в кремний углерода. Спектры комбинационного рассеяния подтверждают наличие в поверхностном слое связей Si—C, а рентгенофлуоресцентные спектры позволяют выделить участки с соотношением атомов углерода и кремния, стехиометрически точно соответствующие карбиду кремния. На рис. 2 приведено изображение поверхности текстурированного *c*-Si в атмосфере CO<sub>2</sub>, 1 Дж/см<sup>2</sup>; давление: *a* — 75 мм рт. ст., *б* — атмосферное.

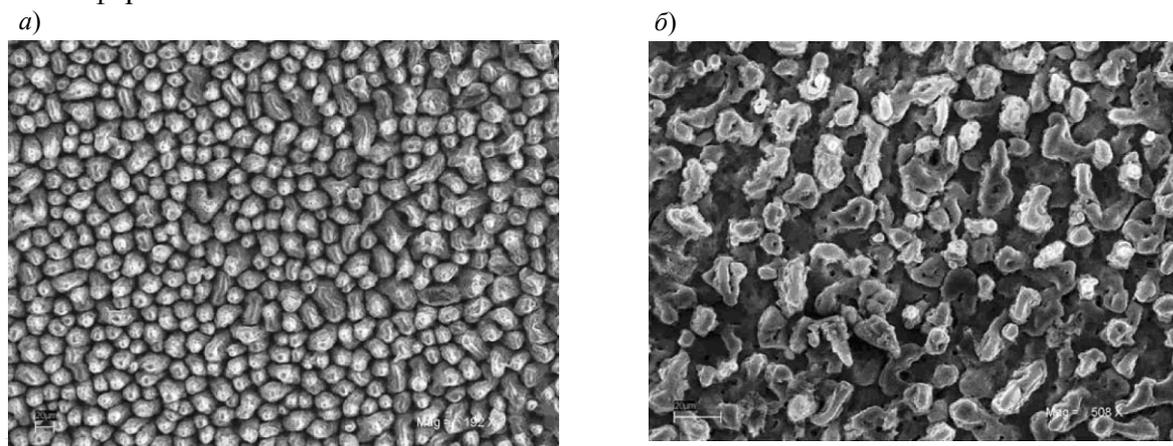


Рис. 2

Таким образом, в атмосфере CO<sub>2</sub> химические реакции на поверхности существенно изменяют механизм формирования начальных (зародышевых) структур, углерод диффундирует в расплавленный кремний, где при кристаллизации сначала происходит формирование рассеянных наноразмерных включений карбида кремния, а затем с ростом их концентрации — сегрегация в более крупные образования. Формирование подобной химически гетерогенной структуры изменяет оптические характеристики поверхности и стимулирует дальнейший ее рост. Изучение элементного состава различных участков лазерно-индуцированных структур показало, что во впадинах, располагающихся между колоннами, в измеряемом спектре присутствует сигнал только от кремния. Более того, в этих областях сигналы от других элементов вообще отсутствуют — проведенные для сравнения контрольные измерения на необработанных участках полированного чистого кремния показывали присутствие следовых количеств углерода и кислорода. При этом на стенках и вершинах колонн наблюдается выраженное присутствие углерода и кислорода, до ~ 25—30 %.

На основе исследований режимов была выбрана предпочтительная схема текстурирования поверхности *mc*-Si. В вакууме были изготовлены образцы размером 20×20 мм со сплошным текстурированием всей их рабочей поверхности, предназначенные для формирования на них фотоэлектрической структуры солнечного элемента. Режим сканирования был выбран таким, чтобы на поверхности подложки из *mc*-Si формировалась равномерно заполняющая весь заданный участок характерная столбчатая текстура в виде массива микроколон, высота большинства которых превышает 45 мкм, расстояние между ними 15 мкм. При этом доменная структура подложки *mc*-Si никак не проявляется, т.е. формируемая лазерным методом текстура является нечувствительной к наличию границ между зернами с различной кристаллографической ориентацией.

Известно, что после лазерного текстурирования образцы должны подвергаться дополнительной обработке для удаления с поверхности дефектного кристаллического слоя и аморфизированных участков. Обычно такая обработка состоит в щелочном травлении [11, 12] с последующим изотропным кислотным [13, 14]. В нашем случае текстурированные образцы mc-Si (рис. 3, *a*) подвергались как кислотному (*б*), так и щелочному (*в*) травлению. Было установлено, что они формируют различные виды морфологии поверхности: изотропное кислотное травление дает более гладкую структуру по сравнению с щелочным, которое чувствительно к кристаллографической ориентации.

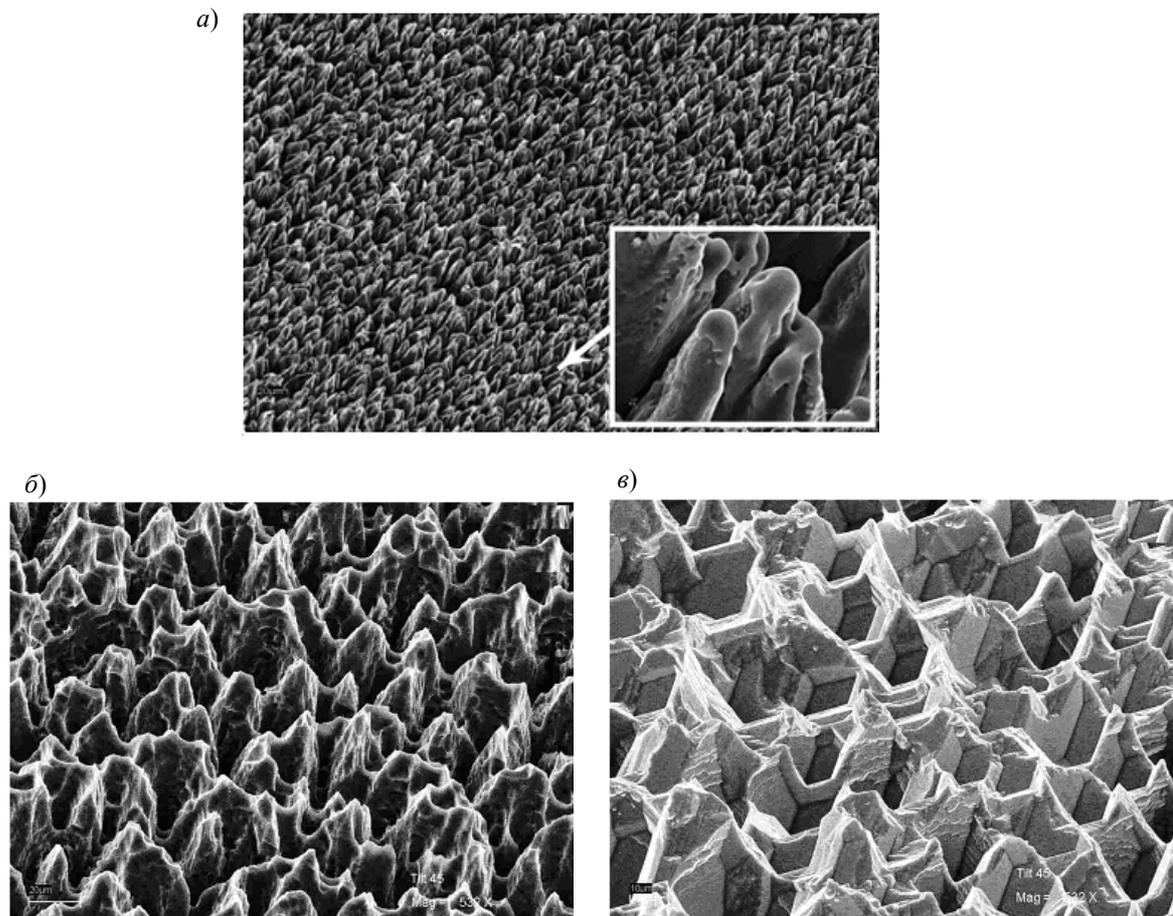


Рис. 3

Была исследована отражательная способность полученных текстурированных образцов mc-Si. Установлено, что лазерное текстурирование приводит к значительному уменьшению отражательной способности по сравнению с плоской нетекстурированной поверхностью. Проведенное травление создает стабильную текстуру, снижая оптическую эффективность, однако образец, протравленный в кислотном растворе, демонстрирует более высокое подавление отражательной способности. Лазерное текстурирование более эффективно снижает коэффициент отражения поверхности, чем традиционные методы. Поверхность характеризуется полным отражением ниже 3 % непосредственно после текстурирования, 5,5 % после кислотного травления и 13,4 % после щелочного травления. На рис. 4 приведены спектры отражения образцов лазерно-текстурированного mc-Si: 1 — после текстурирования без травления; 2 — после 45 мин щелочного травления; 3 — после 55 мин кислотного травления. Для сравнения приведены спектры отражения нетекстурированного mc-Si (4) и c-Si, текстурированного щелочным травлением (5).

На основе полученных подложек mc-Si площадью 20×20 мм, обработанных кислотным травлением, были изготовлены образцы солнечных элементов по технологии LGCell [15, 16],

использование которой позволило повысить КПД солнечного элемента на 0,3 % с 13,4 % у нетекстурированного образца до 13,7 % у текстурированного. Результаты исследования фотovoltaических характеристик солнечных элементов подробно описаны нами ранее [17].

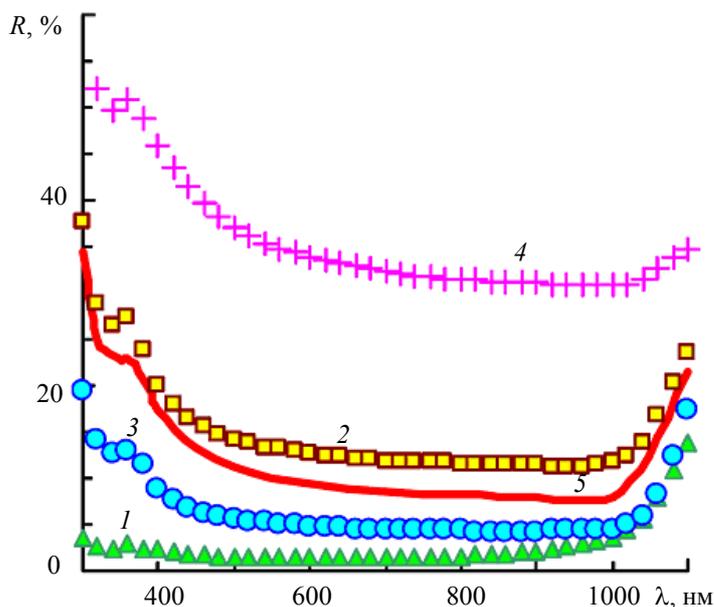


Рис. 4

**Выводы.** Таким образом, в работе показано, что лазерное текстурирование более эффективно снижает коэффициент отражения поверхности по сравнению с традиционным методом щелочного анизотропного травления, применяемым для формирования текстур в виде пирамид на монокристаллическом кремнии. При этом лазерный метод позволяет получать однородную по всей площади и нечувствительную к кристаллографическим ориентациям отдельных кристаллических доменов текстуру на поверхности пластин мульткристаллического кремния. При плотности энергии  $3,5 \text{ Дж/см}^2$  формируются структуры с аспектным отношением  $\geq 3$  (глубина к ширине). Поверхность характеризуется полным отражением ниже 3 % непосредственно после текстурирования, 5,5 % — после кислотного травления и 13,4 % — после щелочного. Лазерное текстурирование в атмосфере газов демонстрирует сложные механизмы взаимодействия компонент газовой атмосферы с поверхностью и требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (гос. контракт № 02.740.11.0055), РФФИ (грант № 09-08-01053-а) и ведущей научной школы НШ-3322.2010.2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kautek W., Roas B., Schults L. Formation of Y-Ba-Cu-oxide thin films by pulsed laser deposition: A comparative study in the UV, visible and IR range // *Thin Solid Films*. 1990. Vol. 191. P. 317—334.
2. Ursu I., Mihailescu I. N., Popa Al., Prohorov A. M., Ageev V. P., Gorbunov A. A., Konov V. I. Studies of the change of a metallic surface microrelief as a result of multiple-pulse action of powerful UV laser pulses // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. P. 3909.
3. Воронов В. В., Долгаев С. И., Лаврищев С. В., Лялин А. А., Смакин А. В., Шафеев Г. А. Формирование конических микроструктур при импульсном лазерном испарении твердых тел // *Квант. электрон.* 2000. Т. 30, № 8. С. 710—714.
4. Khramova O. D., Khaydukov E. V., Zuev D. A., Rocheva V. V., Novodvorsky O. A., Poroykov A. Yu., Dvorkin V. V., Panchenko V. Ya., Akhmanov A. S. Surface modification of crystalline silicon created by the 532 nm nanosecond Nd:YAG laser pulses // *Proc. X Intern. Conf. "Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications"*. Plovdiv, Bulgaria, 2010. P. 75—77.

5. Panek P., Lipinski M., Dutkiewicz J. Texturization of multicrystalline silicon by wet chemical etching for silicon solar cells // J. Mat. Sci. 2005. Vol. 40. P. 1459—1463.
6. Dekkers H. F. W., Duerinckx F., Szlufcik J., Nijss J. Silicon surface texturing by reactive ion etching // Optoelectronics Rev. 2000. Vol. 8, N 4. P. 311—316.
7. Gangopadhyay U., Dhungel S. K., Kim K., Manna U., Basu P. K., Kim H. J., Karunagaran B., Lee K. S., Yoo J. S., Yi J. Novel low cost chemical texturing for very large area industrial multi-crystalline silicon solar cells // Semicond. Sci. Technol. 2005. Vol. 20. P. 938—946.
8. Zhenqiang Xi, Deren Yang, Wu Dan, Chen Jun, Xianhang Li, Duanlin Que. Texturization of cast multicrystalline silicon for solar cells // Semicond. Sci. Technol. 2004. Vol. 19. P. 485—489.
9. Hylton J. D., Burgers A. R., Sinke W. C. Alkaline etching for reflectance reduction in multicrystalline silicon solar cells // J. Electrochem. Soc. 2004. Vol. 151, N 6. P. 408—427.
10. Tsujino K., Matsumura M., Nishimoto Y. Texturization of multicrystalline silicon wafers for solar cells by chemical treatment using metallic catalyst // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2006. Vol. 90, N 1. P. 100—110.
11. Rentsch J., Bamberg F., Schneiderlochner E., Preu R. // Proc. 20<sup>th</sup> Europ. PVSEC. 2005. P. 1321.
12. Dobrzanski L. A., Drygala A., Panek P., Lipinsky M., Zieba P. Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization // Archives of Mater. Sci. and Eng. 2009. Vol. 38. P. 5—11.
13. Zolper J. C., Narayanan S., Wenham S. R., Green M. A. 16.7 % efficient, laser textured, buried contact polycrystalline silicon solar cell // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. P. 2363—2365.
14. Abbott M., Cotter J. Optical and electrical properties of laser texturing for high-efficiency solar cells // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2006. Vol. 14. P. 225—235.
15. Унтила Г. Г., Кост Т. Н., Чеботарева А. Б., Закс М. Б., Ситников А. М., Солoduха О. И. Новый тип высокоэффективных двусторонних кремниевых солнечных элементов с внешними шинами и проволочной контактной сеткой // ФТП. 2005. Т. 39, вып. 11. С. 1393—1398.
16. Untila G., Osipov A., Kost T., Chebotareva A., Zaks M., Sitnikov A., Solodukha O., Pinov A. // Proc. 16<sup>th</sup> PVSEC. Glasgow, 2000.
17. Poroykov A., Untila G., Kost T., Chebotareva A., Timofeyev M., Zaks M., Sitnikov A., Solodukha O., Novodvorsky O., Khaydukov E., Zuev D. Laser textured black multicrystalline silicon solar LGcells // Proc. 25<sup>th</sup> European PVSEC. 2010. 2DV.1.51.

#### Сведения об авторах

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <b>Евгений Валерьевич Хайдуков</b>  | — аспирант; Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; E-mail: khaydukov@mail.ru   |
| <b>Ольга Дмитриевна Храмова</b>     | — канд. хим. наук; Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; старший научный сотрудник; E-mail: onov@mail.ru                                  |
| <b>Василина Васильевна Рочева</b>   | — Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; младший научный сотрудник; E-mail: vrocheva@mail.ru   |
| <b>Дмитрий Александрович Зувев</b>  | — аспирант; Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; E-mail: dmitryzuev@yandex.ru  |
| <b>Олег Алексеевич Новодворский</b> | — канд. физ.-мат. наук; Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; старший научный сотрудник, заведующий лабораторией; E-mail: onov@mail.ru    |
| <b>Андрей Анатольевич Лотин</b>     | — аспирант; Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; E-mail: lotin_82@mail.ru  |
| <b>Любовь Сергеевна Паршина</b>     | — Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская область; младший научный сотрудник; E-mail: goga_107@list.ru   |
| <b>Александр Юрьевич Пороиков</b>   | — Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; ведущий электроник; E-mail: aporoykov@mics.msu.su |

- Михаил Аркадьевич Тимофеев** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; ведущий научный сотрудник;  
E-mail: tma@dnph.phys.msu.ru
- Геннадий Григорьевич Унтила** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник;  
E-mail: guntila@mics.msu.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

УДК 536.42; 539.213.27

Э. И. АГЕЕВ, В. П. ВЕЙКО, К. К. КИЕУ

## МОДИФИКАЦИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ „ФОТУРАН“ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Рассмотрен процесс лазерно-индуцированной модификации фоточувствительного стеклокерамического материала импульсами пикосекундной длительности для второй гармоники YAG:Nd-лазера, а также проведено сравнение данного процесса с инфракрасным фемтосекундным воздействием.

**Ключевые слова:** лазерно-индуцированная модификация, пикосекундные импульсы, фоточувствительная стеклокерамика, Фотуран.

**Введение.** Первые фоточувствительные стеклокерамические материалы (ФСК) появились в конце 1940-х гг. [1]. С момента своего создания они привлекают к себе внимание благодаря уникальной возможности управлять структурно-фазовыми переходами в таких материалах посредством фотоактивации, а также благодаря высоким значениям модуля Юнга и коэффициента пропускания в видимом диапазоне, хорошей химической стабильности и т.д. В состав ФСК входит фотосенсибилизатор, который, поглощая УФ-излучение, осуществляет генерацию фотоэлектронов. В процессе термической обработки данные фотоэлектроны восстанавливают ионы металлов до атомов, что приводит в результате к образованию кластеров металлических наночастиц, на которых затем происходит осаждение кристаллической фазы. Этот механизм широко известен (подробнее см., например, в [2]). При термической обработке изменения в материале происходят только в областях, подвергшихся предварительному облучению. Благодаря подобному двухступенчатому процессу обработки можно управлять такими свойствами ФСК, как оптическая прозрачность, устойчивость материала к химическому травлению. В [3] было показано, что при воздействии излучения импульсного УФ-лазера максимальная глубина создаваемых структур может достигать 1500 мкм (т.е. они располагаются вблизи поверхности). Воздействие излучения CO<sub>2</sub>-лазера вызывает быстрые и обратимые фазовые переходы в стеклокерамике, но вследствие сильного поглощения кварца на длине волны 10,6 мкм также позволяет создавать только поверхностные структуры [4].

При получении трехмерных структур необходимо, чтобы материал был прозрачным для рабочей длины волны, а взаимодействие излучения с веществом происходило бы только в области фокусировки. Данный процесс возможен в случае ультракоротких лазерных импульсов вследствие нелинейных процессов многофотонного поглощения. Другим значительным преимуществом такого воздействия является повышение точности обработки [5]. При ис-

пользовании фемтосекундных лазерных импульсов на длине волны  $\lambda=800$  нм продемонстрирована возможность создания различных устройств для биотехнологии [6], микрооптики [7], химии [8] и многих других. Однако основной особенностью таких исследований, позволяющей получать трехмерные структуры, как и в случае применения УФ-излучения, остается значительная разница в скоростях травления кристаллической и аморфной фаз, отношение между которыми может достигать 22 [3]. Более подробно механизмы взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с ФСК рассмотрены в работах [9, 10]. Для длины волны  $\lambda=10,6$  мкм также существуют технологии создания различных микрооптических устройств [11, 12].

В настоящей работе впервые экспериментально продемонстрирована возможность кристаллизации Фотурана (производства фирмы Shott), аналога российского стекла ФС-1, лазерными импульсами пикосекундной длительности на длине волны 532 нм.

**Эксперимент.** В качестве материала во всех экспериментах использовался ФСК Фотуран. Это литий-алюмосиликатное стекло, состоящее из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , а также содержащее стабилизирующие оксидные добавки. В качестве фотоактивного компонента выступает церий, а роль центров нуклеации играет серебро. Более подробно свойства Фотурана рассмотрены в работе [2].

Для облучения использовалась вторая гармоника пикосекундного YAG:Nd-лазера (PL2143, EXPLA), частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульса 30 пс, максимальная энергия в импульсе до 15 мДж. Фокусировка пучка осуществлялась  $10\times$  объективом с фокусным расстоянием 16 мм и  $\text{NA}=0,25$ . При контроле энергии лазерного излучения были использованы френелевский ослабитель для точного управления и встроенное усиление лазера — для грубого. Измерение энергии лазера проводилось до и после образца при помощи одноканального измерителя мощности и энергии Gentec SOLO 2 вместе с измерительной головкой Gentec QE25. Для точного позиционирования образца использовалась система из автоматических координатных столиков, управляемых микрошаговым контроллером (производства Standa). Схема также позволяла осуществлять позиционирование объектива вдоль оси  $X$  для точной фокусировки лазерного излучения, диаметр пятна в фокусе составлял примерно 15 мкм.

Термическая обработка после лазерного облучения проводилась по стандартному режиму [13]. Затем получаемые структуры были исследованы методами оптической микроскопии и спектроскопии.

**Обсуждение результатов.** Первая серия экспериментов была выполнена по следующей схеме: фокусировка излучения осуществлялась на глубине порядка 500 мкм внутри материала, затем пучок смещался параллельно поверхности при различных значениях скорости сканирования и плотности энергии облучения. На рис. 1 представлены линейные шаблоны, записанные в Фотуране при скорости сканирования 0,01, 0,05 и 0,10 мм/с ( $a$  — слева направо и  $b$  — справа налево) и плотности энергии облучения  $\varepsilon=8$  Дж/см<sup>2</sup> до ( $a$ ) и после ( $b$ ) термообработки; мощность лазерного излучения 0,14 Вт. Как и ожидалось, после термообработки облученные области приобретают коричневый оттенок, в то время как необлученные и по-прежнему аморфные области не претерпевают каких-либо изменений.

Полученные экспериментальные зависимости представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 показана зависимость толщины линии  $b$  после термообработки от плотности энергии облучения при различных скоростях сканирования ( $1$  —  $v = 0,01$ ;  $2$  —  $0,05$ ;  $3$  —  $0,10$  мм/с); на рис. 3 — от скорости сканирования при различных значениях плотности энергии облучения ( $1$  —  $\varepsilon = 26,8$ ;  $2$  —  $39,5$ ;  $3$  —  $54,7$ ;  $4$  —  $70,1$ ;  $5$  —  $86,7$ ;  $6$  —  $104,2$ ;  $7$  —  $116$  Дж/см<sup>2</sup>).

Для сравнения кристаллических структур, образующихся при пикосекундных и фемтосекундных воздействиях, аналогичным образом внутри Фотурана были записаны линейные шаблоны при фемтосекундном облучении (средняя мощность облучения в диапазоне от 2 до 10 мВт, длительность импульса 100 фс, частота следования импульсов 1 кГц). Последующая

термообработка этих образцов была проведена в двух различных режимах: первый — нагрев до 500 °С со скоростью 5 °С/мин, выдержка при данной температуре в течение 1 часа; затем нагрев до 605 °С со скоростью 3 °С/мин и аналогичная выдержка с последующим естественным охлаждением до комнатной температуры (рис. 4, а), второй включал себя выдержку в течение 6 ч при температуре 520 °С (рис. 4, б).

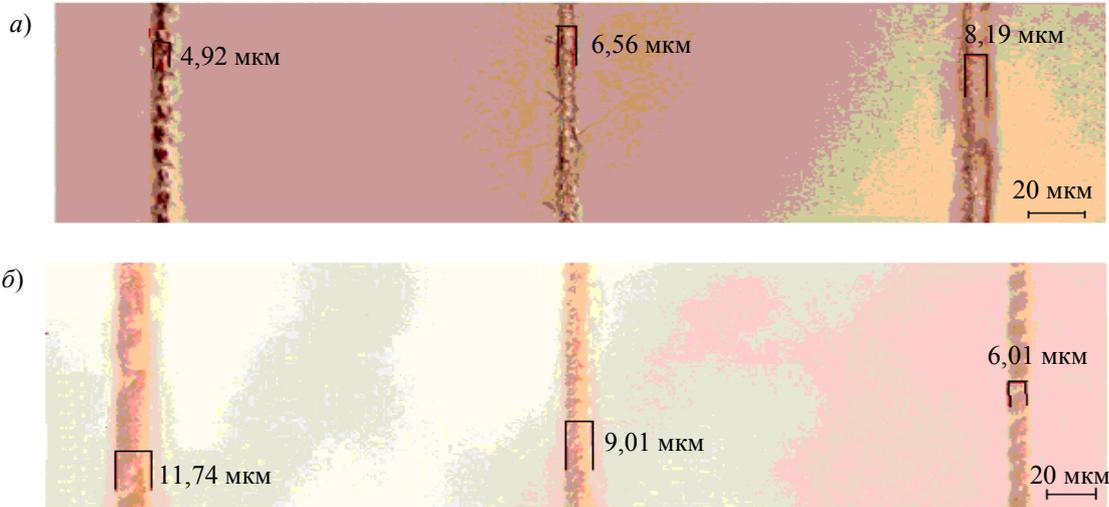


Рис. 1

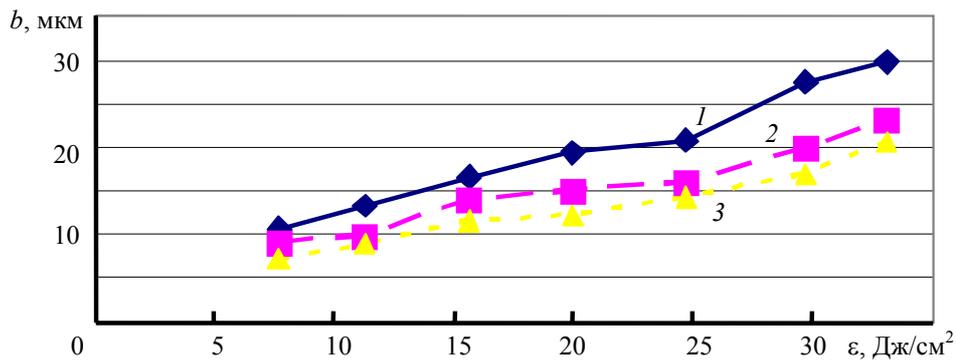


Рис. 2

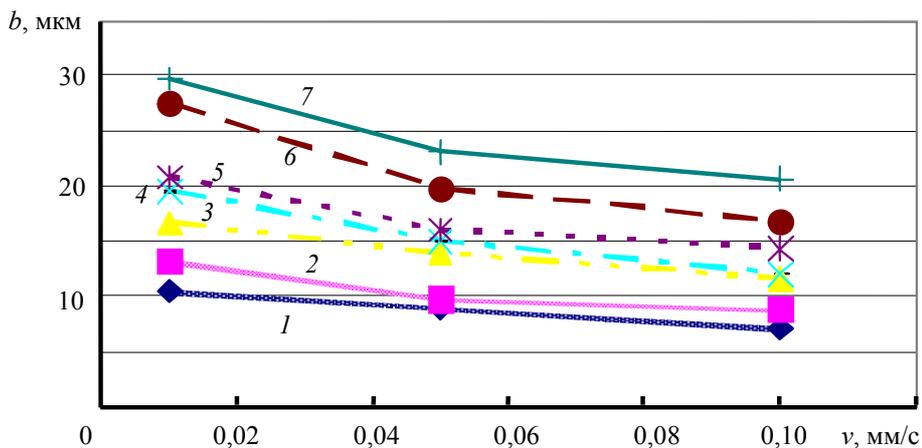


Рис. 3

Толщина линий составляет порядка 10 и 30 мкм для рис. 4, а и б соответственно.

Необходимо отметить, что результаты, представленные на рис. 4, а находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в статье [9] для фемтосекундной кристаллизации. Следует обратить внимание, что для учета различной длительности импульса необходим

переход от плотности энергии к плотности мощности. Рис. 4, б демонстрирует такую же тенденцию для размеров области кристаллизации, как и в работе [14], для образцов, подвергавшихся травлению в 8 %-ной плавиковой кислоте, а именно — увеличение размеров с ростом энергии облучения. Это подтверждает, что структуры, возникающие при воздействии пикосекундного лазера на длине волны 532 нм, имеют схожее происхождение с получаемыми при облучении ИК фемтосекундным лазером.

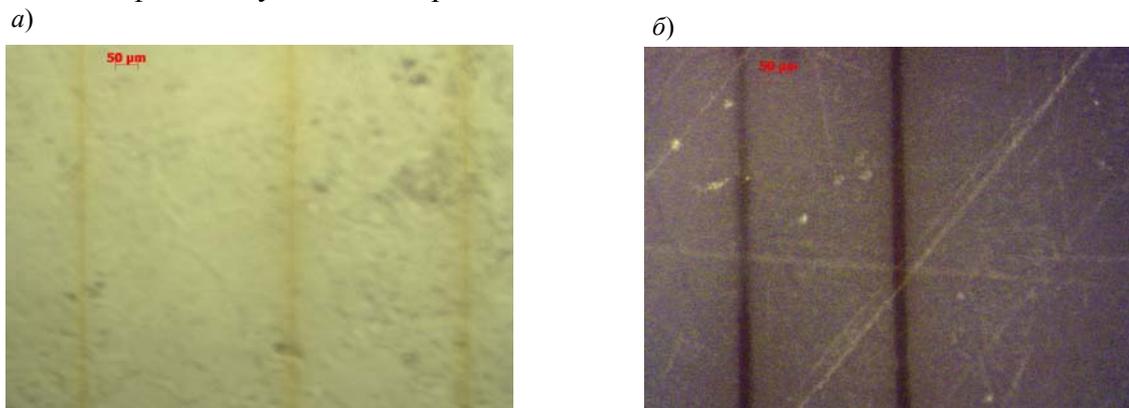


Рис. 4

Для демонстрации возможности создания расположенных в объеме материала структур при помощи данного метода был проведен дополнительный эксперимент. Образцы Фотурана были отполированы с торца, через который осуществлялся ввод излучения в материал. При перемещении образца область фокусировки излучения смещалась от заднего торца к переднему, и наоборот. Таким образом, была показана возможность создания структур, расположенных на глубине от 1 до 5 мм от поверхности.

Согласно [15], облучение фемтосекундным лазером приводит к генерации свободных фотоэлектронов за счет последовательного межзонного возбуждения через энергетические состояния, соответствующие дефектам в материале, таким образом, общее число фотонов, участвующих в этой фотореакции, равняется 6. Энергия фотонов в случае облучения пикосекундным лазером на длине волны 532 нм соответствует 2,33 эВ; и для промежуточного возбуждения на примесной энергетический уровень  $3,6 \pm 0,3$  эВ [16] требуется как минимум 2 фотона, и еще 2 фотона для перехода в зону проводимости.

На рис. 5 приведены спектры пропускания исходного материала и образцов Фотурана ( $\tau$  — коэффициент пропускания), кристаллизованных при различных значениях плотности энергии (1 — исходное стекло; 2 —  $\epsilon = 19,6$ ; 3 — 29,4; 4 — 42,2; 5 — 62,3 Дж/см<sup>2</sup>).

Из рисунка видно, что оптические свойства Фотурана также могут быть изменены в соответствии с параметрами воздействия. Вероятно, различным значениям плотности энергии соответствуют различные размеры возникающих структур, поскольку рассеяние света в основном определяется характеристиками кристаллитов.

**Выводы.** На основе фазового перехода от аморфного к кристаллическому были получены микроструктуры внутри ФСК Фотуран за счет локального воздействия пикосекундных импульсов для второй гармоники YAG:Nd-лазера с последующей температурной обработкой.

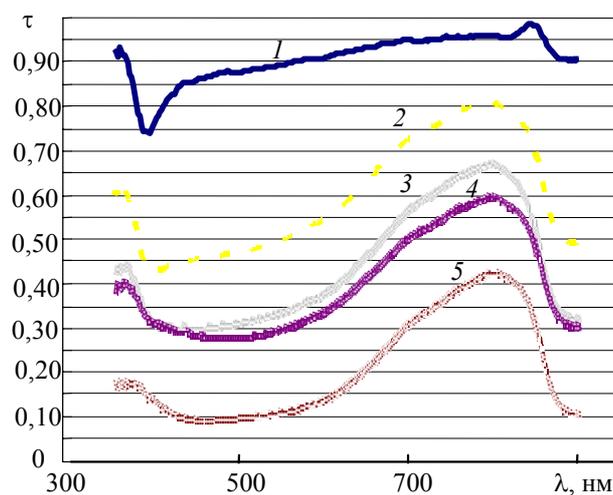


Рис. 5

Показано, что путем контроля таких параметров обработки, как плотность энергии облучения и скорость сканирования, в материале могут быть получены расположенные в объеме материала структуры, размерами и оптическими свойствами которых также можно управлять. Данный метод может найти применение в области биотехнологий, оптики или для создания микрожидкостных устройств.

По-видимому, в основе механизма взаимодействия в случае воздействия пикосекундных лазерных импульсов на длине волны 532 нм с энергией кванта 2,33 эВ лежит двухфотонное поглощение, обеспечивающее образование  $\text{Ce}^{3+}$  ионов. Данный процесс требует меньшей энергии для осуществления кристаллизации, чем в случае ИК фемтосекундного облучения вследствие более высокой вероятности реализации процессов многофотонного поглощения для длины волны 532 нм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-02-00208-а и Государственного контракта № П1134.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stookey S. D.* Photosensitive Glass // *Ind. Eng. Chem.* 1949. Vol. 41, N 4. P. 856—861.
2. *Livingston F. E., Helvajian H.* Photophysical processes that lead to ablation-free microfabrication in glass-ceramic materials // *3D laser microfabrication. Principles and Applications*, Weinheim: WILEY-VCH, 2006. P. 287—339.
3. *Hansen W. W., Janson S. W., Helvajian H.* Direct-write UV-laser microfabrication of 3D structures in lithium-aluminosilicate glass // *Proc. SPIE.* 1997. Vol. 2991. P. 104—112.
4. *Veiko V. P., Nikonorov N. V., Skiba P. A.* Phase-structural modification of glass-ceramic induced by laser radiation // *J. Opt. Technol.* 2006. Vol. 73, N 6. P. 419—424.
5. *Gattas R. R., Mazur F.* Femtosecond laser micromachining in transparent materials // *Nature Photonics.* 2008. Vol. 2. P. 219—225.
6. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K.* Microfabrication of 3D hollow structures embedded in glass by femtosecond laser for Lab-on-a-chip applications // *Appl. Surface Sci.* 2005. Vol. 248. P. 172—176.
7. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K., Masuda M., Toyoda K., Kawach M., Shihoyama K.* Three-dimensional micro-optical components embedded in photosensitive glass by a femtosecond laser // *Optics Lett.* 2003. Vol. 28, N 13. P. 1144—1146.
8. *Dietrich T. R., Freitag A., Scholz R.* Production and characteristics of microreactors made from glass // *Chem. Eng. Technol.* 2005. Vol. 28, N 4. P. 1—7.
9. *Fisette B., Busque F., Degorce J.-Y., Meunier M.* Three-dimensional crystallization inside photosensitive glasses by focused femtosecond laser // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 091 104.
10. *Kim J., Berberoglu H., Xu X.* Fabrication of microstructures in photoetchable glass ceramic using excimer and femtosecond lasers // *J. Microlithography, Microfabrication and Microsystems.* 2004. Vol. 3. P. 478—485.
11. *Veiko V. P., Kieu Q. K., Nikonorov N. V., Shur V. Ya., Luches A., Rho S.* Laser-induced modification of glass-ceramics microstructure and applications // *Appl. Surface Sci.* 2005. Vol. 248. P. 231—237.
12. *Veiko V. P., Kostyuk G. K., Nikonorov N. V., Rachinskaya A. N., Yakovlev E. B., Orlov D. V.* Fast and reversible phase-structure modifications of glass-ceramic materials under  $\text{CO}_2$ -laser action // *Proc. SPIE.* 2007. Vol. 6606. P. 66 060Q.
13. *Masuda M., Sugioka K., Cheng Y., Aoki N., Kawachi M., Shihoyama K., Toyoda K., Helvajian H., Midorikawa K.* 3-D microstructuring inside photosensitive glass by femtosecond laser excitation // *Appl. Phys. A.* 2003. Vol. 76. P. 857—860.
14. *Cheng C. W., Chen J. S., Lee P. X., Chien C. W.* Fabrication of microstructures in Foturan glass using infrared femtosecond laser pulses and chemical etching // *Optics and Lasers in Engineering.* 2010. Vol. 48. P. 811—815.
15. *Hongo T., Sujioka K., Niino H., Cheng Y., Masuda M., Miyamoto I., Takai H., Midorikawa K.* Investigation of photoreaction mechanism of photosensitive glass by femtosecond laser // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 97. P. 063 617.

16. Fissette B., Meunier M. Three-dimensional microfabrication inside photosensitive glasses by femtosecond laser // J. of Laser Micro/Nanoengineering. 2006. Vol. 1, N 1. P. 7—11.

**Сведения об авторах**

- Эдуард Игоревич Агеев** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; младший научный сотрудник;  
E-mail: ageeved@gmail.com
- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; зав. кафедрой;  
E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Кхань Киок Киеу** — канд. техн. наук; Университет Аризоны, США

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

УДК 66.088:543.4:681.7

Е. Л. СУРМЕНКО, И. А. ПОПОВ, Т. Н. СОКОЛОВА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
ДЛЯ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ ШВАХ**

Исследовано перераспределение элементов в сварном шве стальных пластин. Методом эмиссионного лазерного спектрального анализа выявлены тенденции к горизонтальной и вертикальной миграции легирующих элементов марганца (к фронтальной стороне шва) и алюминия (к противоположной стороне с концентрацией по средней линии). Исследованы зависимости перераспределения элементов от типа и параметров сварки.

**Ключевые слова:** лазер, сварка, сварной шов, состав, спектральный анализ, LIBS.

При сварке, когда важны локальность, малая длительность воздействия и внешний вид сварного соединения, наиболее часто используется лазер. Многочисленные исследования показали значительные изменения структуры, элементного состава и физических свойств материала в зоне лазерной обработки [1—3], т.е. высокоинтенсивного лазерного воздействия. Таким образом, распределение легирующих элементов после завершения воздействия лазерных импульсов отличается от начального, т.е. изменяется элементный состав вещества, что может влиять на физические, механические и эксплуатационные свойства материалов.

Основной механизм миграции химических элементов сплава связан с фазовыми превращениями вещества. После начала взаимодействия лазерного излучения с веществом на границе разрушения формируется тонкий слой расплава. Чем выше плотность мощности излучения, тем тоньше слой расплава в обрабатываемом материале для каждого определенного уровня энергии или мощности. Материал при взаимодействии с лазерным излучением может быть обогащен или обеднен легирующими элементами и примесями благодаря различной скорости испарения легирующих элементов и металла-основы, а также различной растворимости веществ в жидкой и твердой фазах. Первый фактор проявляется в том, что при движении границы расплава испаряются атомы примесей с поверхности граничного слоя, а также из переходного слоя, прилегающего к границе. Второй — в том, что граница „жидкая фаза—твердый материал“ перемещается во время лазерного воздействия в глубь основного

материала при этом примеси из твердой фазы переходят в жидкую, поскольку их растворимость выше, чем в твердой. Скорость растворения определяется температурой жидкой фазы, длительностью контакта между фазами, физической природой атомов примеси и их концентрацией. Для большинства материалов их растворимость в жидкой фазе выше, чем в твердой. Именно поэтому перед границей жидкой фазы со стороны основного материала в большинстве случаев формируется слой, обедненный примесями.

В настоящей работе исследовалось перераспределение химических элементов в сварных соединениях по глубине проплавления и в горизонтальных зонах сварного шва (рис. 1, а), объекты исследования — соединения стальных пластин встык и внахлест. В состав стального сплава входят следующие легирующие элементы: 0,1% Al, 0,4 % Mn. Лазерная шовная сварка была произведена на установке TRUDISC 1000 (фирма Trumpf, Германия) в непрерывном режиме дисковым Yb:YAG-лазером, длина волны  $\lambda=1,03$  мкм, мощность  $P=1$  кВт. Толщина свариваемых кромок 2 мм. Ширина сварных швов встык на материале 3—4 мм со стороны лазерного воздействия и 0,5—1,5 мм с обратной стороны. Скорость сварки встык — 1,7 мм/мин, внахлест — 2,5.

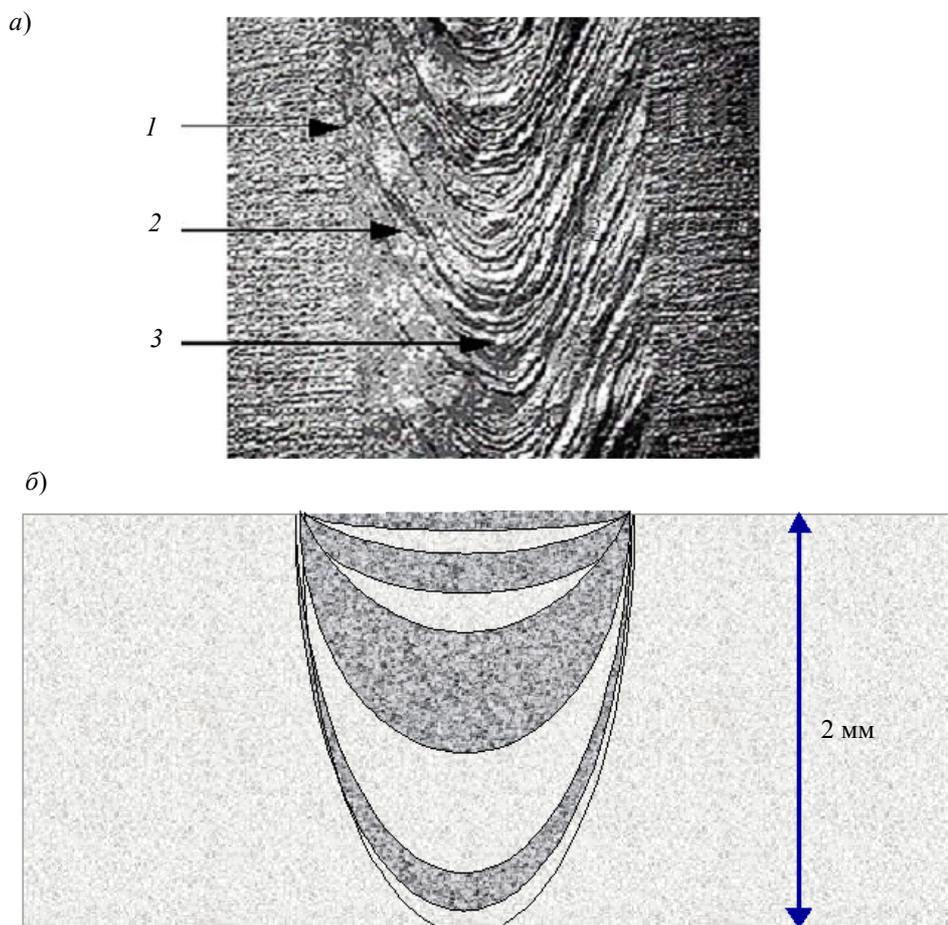


Рис. 1

Широкие лазерные сварные швы (4—5 мм) были изучены в трех горизонтальных зонах: граничной 1, центральной 3 и промежуточной 2 (между граничной и центральной). Если ширина шва была меньше 4 мм, промежуточная зона исключалась из рассмотрения, исследовались только граница и центр таких сварных швов.

При исследовании перераспределения химических элементов в направлении действия лазерного излучения рассматривались восемь вертикальных зон (рис. 1, б): по четыре со стороны воздействия лазерного излучения и с обратной стороны. Три зоны определялись при

трехкратном лазерном сканирующем пробоотборе [4] на глубине 100, 130 и 145 мкм, одна — в ту же область точечным пробоотбором на 300 мкм.

Распределение химических элементов в лазерном сварном шве было изучено методом лазерного эмиссионного микроспектрального анализа, этот метод более известен под названием “LIBS” (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Исследование было выполнено на установке LIBS-анализа LDMA. Источник возбуждения спектров — Nd:YAG-лазер ( $\lambda=1,06$  мкм), работающий в режиме „гигантского импульса“. Частота повторения импульсов 25 Гц; плотность мощности в моноимпульсном режиме  $10^{10}$ — $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>; размер пятна фокусировки от 10,8 мкм; диаметр лазерного кратера на поверхности материала до 250 мкм; предел обнаружения элемента  $10^{-10}$  г; относительный предел обнаружения от 0,001 %. В качестве диспергирующего устройства применялся спектрограф ДФС-458С. Регистрация и обработка спектров осуществлялись ПЗС-камерой МИРС [5] (программное обеспечение Spectran).

Пробоотбор из сварного шва осуществлялся тремя последовательными заглуплениями в точку. Время экспозиции составляло 1 с. Для каждой зоны было зарегистрировано по четыре комплекта спектров.

В первой части эксперимента исследовалось поведение химических элементов при удалении от края лазерных сварных швов к центральной зоне по плоскости образца. Исследования проводились со стороны лазерного воздействия только для образцов сварки встык, поскольку при сварке внахлест плоскостность шва изначально нарушена.

Диаграммы перераспределения Mn (1) и Al (2) представлены на рис. 2 ( $C$  — концентрация элемента,  $h$  — расстояние от центра шва). Данные типичны для швов с достаточно широкой фронтальной стороной сварного соединения (со стороны действия лазерного излучения) и узкой обратной стороной. Граница „жидкая фаза—твердый материал“ (край лазерного сварного шва) в горизонтальной плоскости действительно обеднена примесями. Элементный состав шва по центральной линии не отличается от заданного профиля легирования.

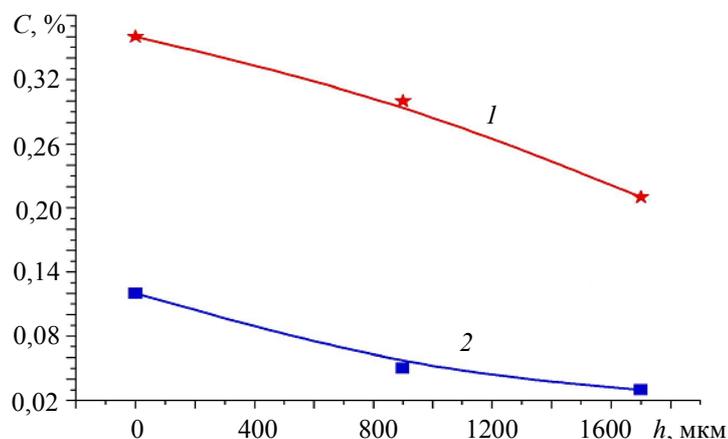


Рис. 2

Результаты исследования поведения химических элементов при заглуплении в направлении воздействия луча при сварке неодинаковы для различных элементов и разных типов соединения.

При сварке внахлест наблюдаются сходные картины для алюминия и марганца (рис. 3, б). В приповерхностных слоях, как на фронтальной поверхности шва, так и на задней, наблюдаются зоны обеднения примесями. Сразу за ними следуют обогащенные слои, обусловленные образованием твердосплавных оксидов Al и Mn [6], а также сульфидами Mn. Из вида зависимости на рис. 3 можно заключить, что обогащение происходит как за счет граничных слоев сварной ванны, так и за счет внутренней области сварного шва (между фронтальной и задней поверхностью). Примеси оттягиваются из внутренней области шва, но благодаря обогащенным

приповерхностным слоям шва внутренняя область сварного соединения защищена от химических воздействий, коррозии.

В случае сварки встык график для Al (рис. 4, а) не демонстрирует обедненных зон на поверхности, а миграция примесей к задней части шва более значительна, чем при сварке внахлест. Зависимость для Mn (рис. 4, б) схожа с зависимостью для сварки внахлест, но зоны локального приповерхностного обогащения инвертированы: фронтальная часть шва обогащена, а задняя — обеднена примесями.

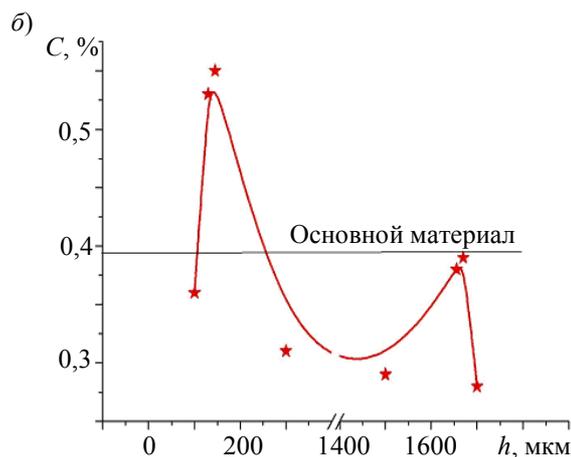
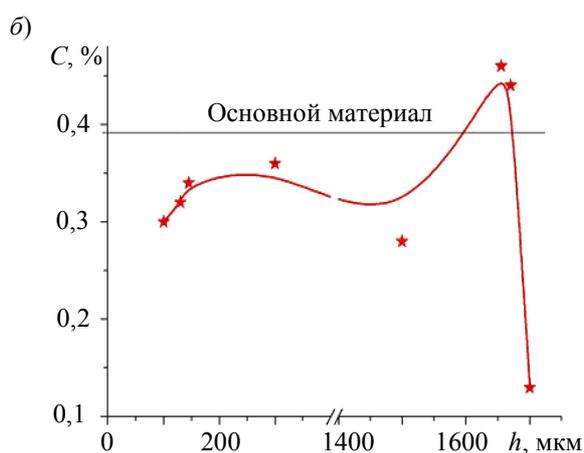
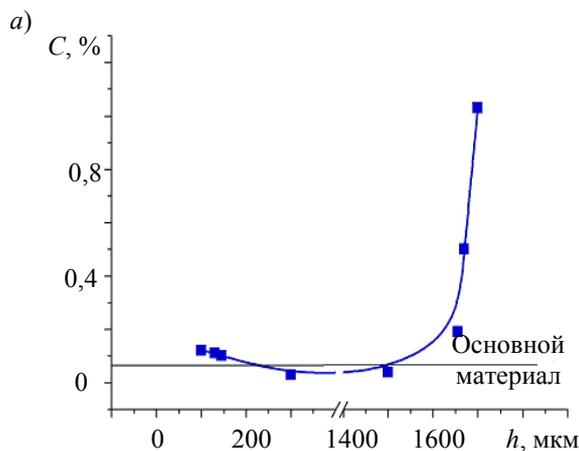
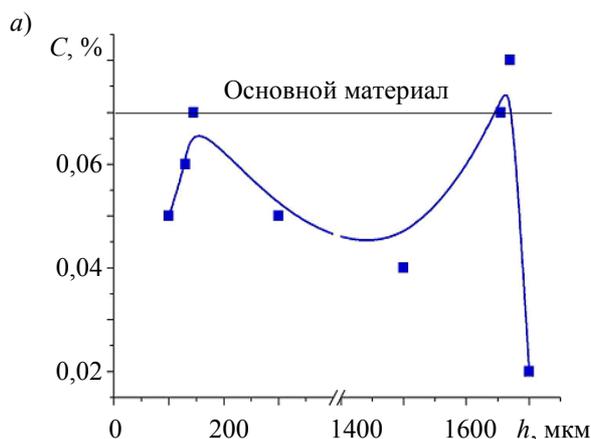


Рис. 3

Рис. 4

Результаты проведенных исследований показывают, что распределение химических элементов в лазерном сварном соединении действительно изменяется при удалении от границы жидкой и твердой фазы в зависимости от глубины плавления и от поверхностного расстояния по ширине шва. Состав центральной поверхностной зоны шва совпадает с изначальным.

При сварке встык различные элементы мигрируют в рамках области: например, Mn во — фронтальную, а Al — в противоположном направлении. Кроме того, при сварке встык не наблюдается локальных зон приповерхностного обеднения алюминием. При сварке внахлест оба элемента мигрируют от фронтальной поверхности шва.

Полученные результаты позволяют предположить, что при достаточно толстых сварных кромках обеднение и обогащение может сильно повлиять на состав материала. Изменение элементного состава шва влияет на эксплуатационные свойства полученной конфигурации: пластичность, твердость, электро- и теплопроводность, поэтому следует учитывать возможность изменения состава сварного шва при разработке приборов, предназначенных для функционирования в экстремальных условиях.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-8473.2010.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
2. Milewski J. O., Barbe M. B. Modeling and analysis of laser melting within a narrow groove weld joint // Welding J. Supplement. 1999. Vol. 78, N 4. P. 109—115.
3. Surmenko E. L., Sokolova T. N. Study of chemical elements distribution in a laser weld joint // Laser Technologies in Welding and Material Proc. Kiev: E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU, 2005. P. 195—197.
4. Surmenko E. L., Tuchin V. V., Sokolova T. N., Chebotarevsky Yu. V., Konyushin A. V. Application of scanning sampling for studying of coatings // Proc. SPIE. Bellingham. 2005. Vol. 5707. P.117—121.
5. Демин А. П., Пеплов А. А., Соколова Т. Н., Сурменко Е. Л. Лазерный эмиссионный спектральный анализ состава покрытий с помощью многоканального измерительного регистратора спектров МИРС // Тез. докл. XVII Уральской конф. по спектроскопии. Новоуральск: Аналитика и контроль, 2005. С. 17.
6. Забелин А. М., Оришич А. М., Чирков А. М. Лазерные технологии машиностроения. Новосибирск: НГУ, 2004. 142 с.

**Сведения об авторах**

- Елена Львовна Сурменко** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Саратовский государственный технический университет, кафедра электронного машиностроения и сварки; E-mail: surmenko@yandex.ru
- Иван Андреевич Попов** — аспирант; Саратовский государственный технический университет, кафедра теоретической механики; E-mail: antaresrock@yandex.ru
- Татьяна Николаевна Соколова** — канд. техн. наук; Саратовский государственный технический университет, кафедра электронного машиностроения и сварки; E-mail: sokolova@pribor-t.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

А. Ф. МУХАМЕДГАЛИЕВА, А. М. БОНДАРЬ, И. В. ВЕЛЕСЕВИЧ,  
М. Г. ЗИЛЬБЕРШМИДТ, В. Б. ЛАПТЕВ, И. М. ШВЕДОВ

## ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ СИЛИКАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА

Исследованы периодические структуры, возникающие на поверхности плавленного и кристаллического кварца, а также некоторых природных силикатов под действием импульсного СО<sub>2</sub>-лазера с длительностью импульса 70 нм и энергией в импульсе 1 Дж. Особенности их образования исследованы с помощью оптических микроскопических и ИК спектроскопических методов. Длина периодов решеток на кристаллическом кварце примерно равна 7,3 мкм, на плавленном кварце — 8 мкм при частоте лазера 975 см<sup>-1</sup>.

*Ключевые слова:* СО<sub>2</sub>-лазер, плавленный кварц, кристаллический кварц, силикаты, периодические структуры, ИК-спектры отражения.

**Введение.** Проведенные рядом исследователей эксперименты показали, что воздействие СО<sub>2</sub>-лазера на поверхность некоторых твердых тел приводит к образованию поверхностных периодических структур. Впервые такие структуры были получены авторами работы [1]. В последние годы было установлено, что многоимпульсное воздействие фемтосекундного лазерного излучения видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов на некоторые материалы также приводит к появлению одномерных квазипериодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны лазерного излучения [2].

В настоящей работе исследуются периодические структуры, возникающие на поверхности плавленного и кристаллического кварца, а также некоторых природных силикатов под действием наносекундных импульсов СО<sub>2</sub>-лазера. Для уточнения физико-химического механизма образования этих структур привлекаются также данные проведенных ранее химических и люминесцентных исследований облученной поверхности силикатов [3].

**Экспериментальные исследования.** Особенностью воздействия излучения СО<sub>2</sub>-лазера на силикаты является сильное поглощение его поверхностью силикатов. Это связано с резонансным взаимодействием излучения с валентными колебаниями атомов Si и O в силикатной матрице. Под действием сфокусированного излучения СО<sub>2</sub>-лазера с плотностью мощности более 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup> возникает лазерный факел, а также происходит модификация облучаемой поверхности.

Ранее нами было установлено, что при воздействии излучения непрерывного СО<sub>2</sub>-лазера на силикатные минералы и горные породы происходят селективная возгонка оксидов кремния с облученной поверхности и обогащение поверхности металлообразующими элементами [4, 5].

Исследование ИК-спектров поглощения и отражения облученных силикатов, проведенное ранее, позволило также обнаружить эффект выжигания провала в области частоты лазерного воздействия. Этот эффект, видимо, связан с разрывом прочных Si—O-связей, вызываемым резонансным лазерным воздействием на силикатную матрицу [6]. В настоящей работе изучается связь между процессом образования рельефа периодических структур и структурными изменениями, происходящими на поверхности при условии резонансного взаимодействия лазерного излучения с веществом.

В качестве объектов исследования использовались образцы кристаллического кварца, аморфного кварца, нефелина —  $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$  и родонита —  $\text{CaMn}_4[\text{Si}_5\text{O}_{15}]$ , облученные им-

пульсным CO<sub>2</sub>-лазером с длительностью импульса 70 нм с энергией в импульсе 1 Дж. Эффективный диаметр лазерного пятна составлял 1,4 мм.

Излучение CO<sub>2</sub>-лазера фокусировалось на поверхность образца в обычной воздушной среде. Под действием лазерного излучения на облучаемой поверхности возникает эрозионный факел. В области воздействия лазерного излучения происходит фотоиндуцированная модификация поверхности. После обработки в течение одного-двух часов были сняты ИК-спектры отражения облученных образцов и в течение суток была проведена микроскопическая съемка поверхности образцов, подвергшихся лазерному облучению.

CO<sub>2</sub>-лазер функционировал в двух режимах — одномодовом с плотностью энергии 5,2 Дж/см<sup>2</sup> и многомодовом с 48 Дж/см<sup>2</sup>, частота излучения — 975 и 1076 см<sup>-1</sup>.

**Экспериментальные результаты.** С помощью микроскопического анализа облученной поверхности было установлено, что чистые периодические структуры образуются только при одномодовом режиме облучения, при многомодовом на поверхности образуется сложный рельеф, состоящий из квазипериодических структур и регулярно расположенных овальных углублений.

На рис. 1 представлено изображение области воздействия трех импульсов одномодового лазера (плотность энергии 5,2 Дж/см<sup>2</sup>) на поверхность кристаллического кварца с частотой 975 см<sup>-1</sup>, аналогичные структуры образуются на кристаллическом кварце при облучении тремя импульсами одномодового лазера на частоте 1076 см<sup>-1</sup>. На снимке присутствуют периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной волны падающего излучения. При облучении тремя импульсами многомодового лазера (плотность энергии 48 Дж/см<sup>2</sup>) снимки лазерных пятен демонстрируют более сложную квазипериодическую структуру, связанную с составом воздействующего лазерного излучения. На рис. 2 представлено лазерное пятно, облученное тремя импульсами многомодового лазера (плотность энергии 48 Дж/см<sup>2</sup>) на частоте 1076 см<sup>-1</sup>.

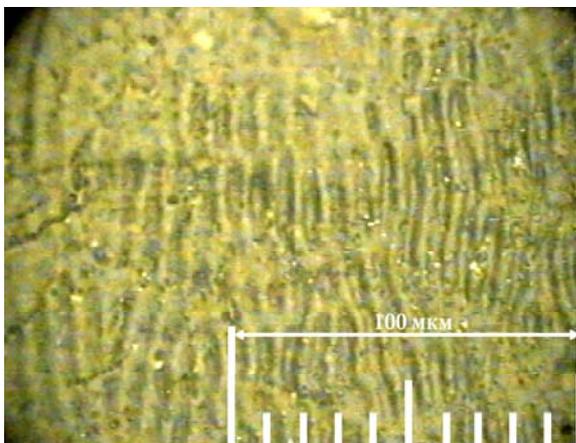


Рис. 1

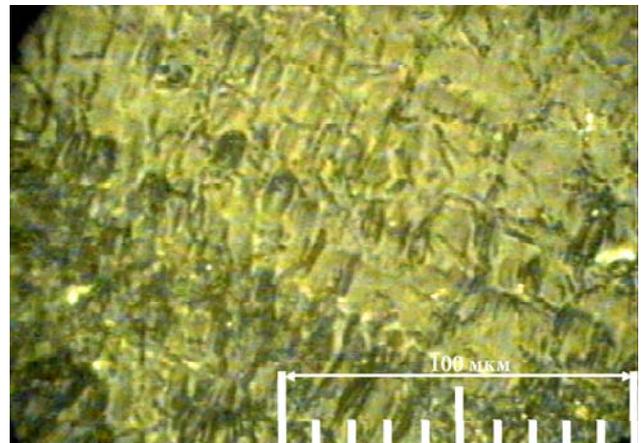


Рис. 2

Воздействие импульсного излучения одномодового лазера на плавленный кварц также приводит к образованию периодических структур, при этом возникают структуры двух типов — концентрические (относительно центра лазерного пятна) кольца, а также системы полос, интенсивность которых увеличивается в области совмещения двух соседних лазерных пятен. Повышение контраста периодических структур при увеличении числа лазерных импульсов (до шести) демонстрирует рис. 3, где приведен снимок области совмещения двух соседних лазерных пятен на плавленном кварце, частота излучения 975 см<sup>-1</sup>, плотность энергии 5,2 Дж/см<sup>2</sup>.

Были сняты ИК-спектры отражения образцов до и после лазерного облучения на двух указанных частотах лазера. Наибольшее изменение в спектрах отражения наблюдается при лазерном облучении с плотностью энергии 48 Дж/см<sup>2</sup> тремя импульсами на частоте 1076 см<sup>-1</sup>.

Соответствующие спектры приведены на рис. 4 ( $I$  — интенсивность отраженного излучения,  $k$  — волновое число). Сравнение спектров облученного (2) и необлученного (1) образца показывает, что в спектре облученного происходит выжигание линии в районе частоты (отмечено стрелкой) лазерного воздействия, а также выжигание линии в районе  $450\text{ см}^{-1}$ . В спектрах отражения образцов кварца, облученных при плотности энергии  $48\text{ Дж/см}^2$  тремя импульсами излучения на частоте  $975\text{ см}^{-1}$ , такого заметного выжигания не наблюдается, хотя выжигание линии в районе  $450\text{ см}^{-1}$  присутствует.

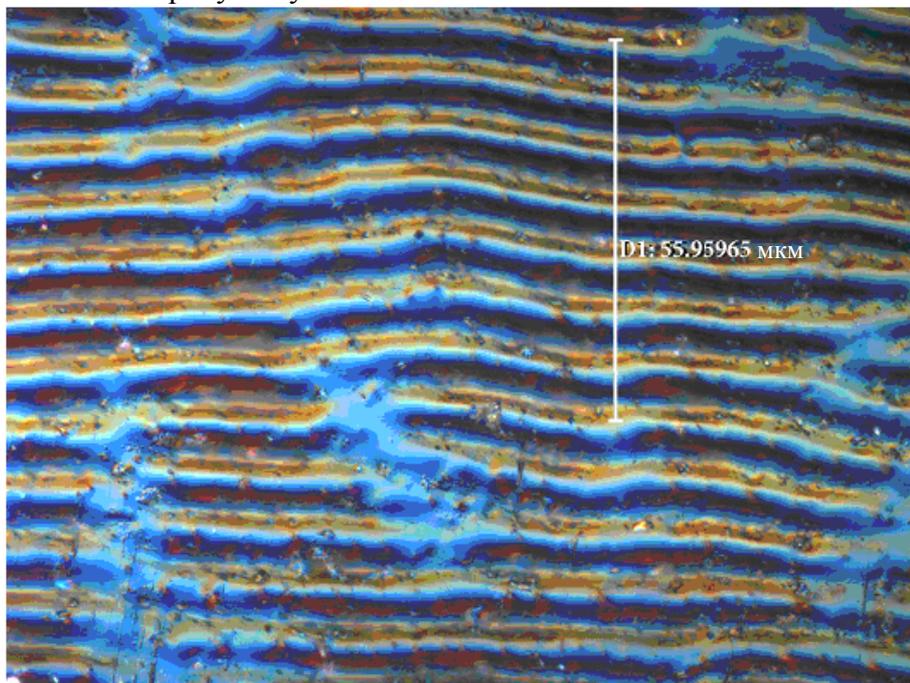


Рис. 3

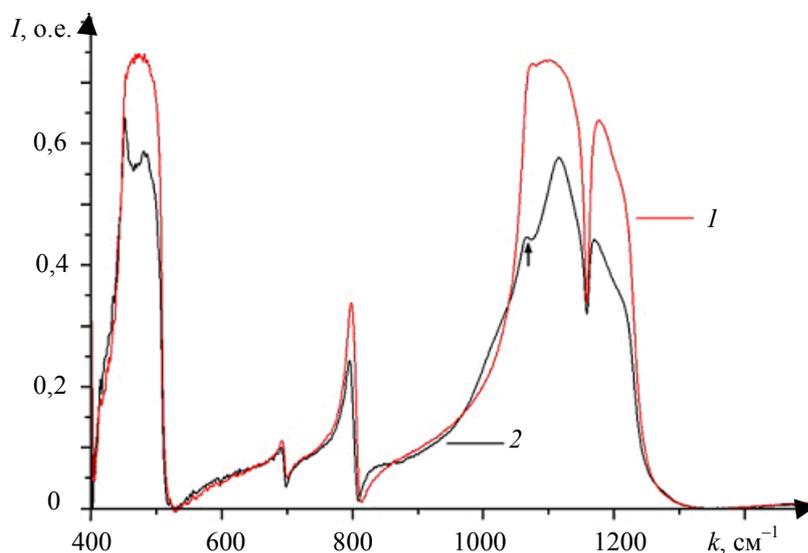


Рис. 4

Была измерена длина периодов структур: для кристаллического кварца, облученного лазером с частотой  $975\text{ см}^{-1}$  —  $7,3\text{ мкм}$ ,  $1076\text{ см}^{-1}$  —  $7,1\text{ мкм}$ ; для плавленого кварца, облученного лазером с частотой  $975\text{ см}^{-1}$  —  $8\text{ мкм}$ .

**Обсуждение результатов.** Возникновение периодических структур на поверхности силикатов при воздействии на них импульсного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера с длительностью импульса  $70\text{ нм}$  позволяет сделать некоторые выводы.

Периодические структуры в силикатах возникают при интерференции падающей и поверхностной электромагнитных волн [7]. Скорость абляции максимальна в областях с наибольшей освещенностью. Из теории поверхностных электромагнитных волн следует, что период таких периодических структур  $\Lambda$  равен:

$$\Lambda = \lambda/n,$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего лазерного излучения,  $n$  — показатель преломления облучаемого материала.

Полученные нами значения периодов структур в пределах точности измерений вписываются в данную модель, если учесть, что показатель преломления должен немного уменьшиться в результате структурных изменений, вызванных резонансным лазерным воздействием.

Зависимость глубины рельефа от числа лазерных импульсов свидетельствует об абляционном характере возникновения периодических структур. Это подтверждается и тем, что в спектрах отражения облученных образцов прослеживается такая зависимость изменений отражения. В этих спектрах наблюдается ступенчатое изменение интенсивности отражения в районе частоты лазерного воздействия при увеличении числа воздействующих импульсов [4].

Зависимость глубины рельефа от частоты лазерного воздействия свидетельствует о резонансном характере лазерного воздействия. ИК-спектры отражения образцов, облученных на двух частотах — 975 и 1076  $\text{см}^{-1}$ , демонстрируют существенные различия. Как можно видеть на рис. 4, в спектре отражения кристаллического кварца, облученного на частоте 1076  $\text{см}^{-1}$  (вблизи максимума линии поглощения кварца), происходит выжигание линии шириной примерно 20  $\text{см}^{-1}$  на частоте лазерного воздействия. При частоте излучения 975  $\text{см}^{-1}$  (на краю линии поглощения) такого заметного эффекта не наблюдается, хотя выжигание линии в районе частоты 450  $\text{см}^{-1}$  тоже присутствует, следовательно, при облучении и на этой частоте происходит абляция материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что резонансное воздействие лазерного излучения на материалы в среднем ИК-диапазоне обеспечивает возникновение периодических структур при воздействии одного-трех импульсов наносекундной длительности при потоке энергии порядка 5,2 Дж/см<sup>2</sup>. Интенсивная абляция связана с разрывом прочных ковалентных кремний-кислородных связей в области частоты лазерного воздействия, о чем свидетельствуют ИК-спектры облученных образцов.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований воздействия импульсного излучения CO<sub>2</sub>-лазера на силикаты позволяют сделать вывод, что в условиях одномодового режима при потоке энергии порядка 5,2 Дж/см<sup>2</sup> и при воздействии нескольких импульсов с длительностью 70 нс на поверхности силикатных минералов образуются периодические структуры, зависящие от частоты воздействующего лазерного излучения.

Полученные структуры могут найти применение в микро- и оптоэлектронике, при изготовлении дифракционных решеток, фильтров, сенсоров и в других областях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siegrist M., Kaech G., Kneubuhl F. H. Formation of periodic wave on the structure of solid by TEA-CO<sub>2</sub> laser pulses // Appl. Phys. 1973. Vol. 2. P. 45—46.
2. Голосов Е. В., Емельянов В. И., Ионин А. А., Колобов Ю. Р., Кудряшов С. И., Лигачев А. Е., Новоселов Ю. Н., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Фемтосекундная лазерная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана // Письма в ЖЭТФ. Т. 90, вып. 2. С. 116—120.
3. Бондарь А. М., Мухамедгалиева А. Ф., Шведов И. М. Фотовосстановительные процессы и формирование нанокластеров на поверхности силикатов, индуцированные излучением CO<sub>2</sub> лазера // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. С. 474—479.
4. Bondar A. M., Mukhamedgalieva A. F. Photochemical induced burning of a spectral line in infrared reflection spectra of silicates // J. Russian Laser Res. NY: Plenum press, 1996. Vol. 17. P. 534—538.

5. Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М. Лазерно-стимулированные реакции на поверхности кварца и некоторых минералов // Поверхность, физика, химия, механика. 1983. № 5. С. 125—129.
6. Mikhamedgalieva A. F. and Bondar A. M. Laser-induced selective sublimation from silicates // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2118. N 33. P. 224—226.
7. Вейко В. П., Либенсон М. Н., Червяков Г. Г., Яковлев Е. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. М.: Физматлит, 2008. 312 с.

**Сведения об авторах**

- Анеля Фазуловна Мухамедгалиева** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Московский государственный горный университет, кафедра физики; E-mail: anel-mgggu@mail.ru
- Анатолий Михайлович Бондарь** — канд. физ.-мат. наук; Московский государственный горный университет; E-mail: bam-imet@mail.ru
- Владимир Борисович Лаптев** — канд. физ.-мат. наук; Институт спектроскопии РАН, Троицк, Московская область; старший научный сотрудник; E-mail: laptev@isan.troitsk.ru
- Михаил Григорьевич Зильбершмидт** — д-р техн. наук, профессор; Московский государственный горный университет, кафедра физики горных пород
- Ирина Васильевна Велесевич** — Московский государственный горный университет; старший научный сотрудник
- Игорь Михайлович Шведов** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный горный университет, кафедра физики горных пород; E-mail: svirell@mail.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

В. П. ВЕЙКО, С. Г. ГОРНЫЙ, Г. В. ОДИНЦОВА, М. И. ПАТРОВ, К. В. ЮДИН

## ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЕЕ ЛАЗЕРНОМ ОКИСЛЕНИИ

Экспериментально и теоретически исследован процесс формирования цветных оксидных пленок на поверхности нержавеющей стали в результате воздействия излучения лазера ИК-диапазона. Предложен способ выбора параметров лазерного излучения, влияющих на цвет металлической поверхности при изменении времени экспозиции или мощности излучения.

*Ключевые слова:* взаимодействие излучения с веществом, лазер, абляция, оксиды, тонкие пленки.

**Введение.** Возможности лазерной маркировки и гравировки (информационные, декоративные и художественные) поверхности металлических изделий могут быть существенно расширены, если высокую разрешающую способность и точность изображения, гибкость, оперативность и простую перестройку, бесконтактность и минимальное деформирующее воздействие на деталь, высокую износостойкость изображения дополнить возможностью управления цветом наносимого изображения.

Такая „цветная“ версия метода лазерной маркировки и гравировки может быть полезна, в частности, в промышленном производстве (нанесение цветных логотипов на выпускаемую продукцию с целью исключения возможности подделки), в рекламном бизнесе (сувенирная продукция, визитки, шильдики, панели приборов), в ювелирном производстве, декоративно-прикладном искусстве и т.п. Примером может служить эффект окисления металлов на воздухе при нагревании. При окислении наблюдается образование „цветов побежалости“, каждый из которых соответствует определенному (одному из возможных) окислу данного металла. Лазерное импульсное нагревание предоставляет уникальную возможность управления геометрической структурой (топологией) образующихся окислов и степенью окисления металлов, что в принципе позволяет создавать полноцветное изображение на металлических поверхностях.

Целью настоящей работы являлось исследование механизмов и оптимизация режимов управляемого формирования на металлической поверхности цветных оксидных изображений.

**Экспериментальное оборудование и методика эксперимента.** Для проведения экспериментов по воздействию излучения на металлические поверхности использовалась установка „МиниМаркер™-М10“ [1], построенная на основе волоконного лазера с диодной накачкой и акустооптической модуляцией добротности на длине волны  $\lambda=1,07$  мкм. Установка работает в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульсов  $\tau=100$  нс, частотой следования  $f=10—100$  кГц и энергией  $J=0,01—0,5$  мДж.

На металлическую поверхность образца лазерное излучение проецировалось в круглое пятно диаметром около  $d=50$  мкм с относительно резким краем и равномерным распределением интенсивности, с плотностью мощности  $q=(0,1—1,8) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Для формирования элемента изображения применялось построчное сканирование поверхности образца пучком лазерного излучения со скоростью  $V=1—250$  мм/с и шагом строк сканирования около 50 мкм. Сканирование осуществлялось при помощи двухосевого гальванометрического сканатора, входящего в состав установки. Энергия и средняя мощность лазерного излучения измерялись при помощи пироэлектрического приемника PE-25

(OPHIR Opt.). В качестве образцов были выбраны шлифованные пластины нержавеющей стали размером 10×10×2 мм. Облучение образцов проводилось при нормальных лабораторных условиях на воздухе.

В установке „МиниМаркер™-M10“ средняя мощность лазерного излучения и продолжительность воздействия на образец определяются частотой следования импульсов и скоростью сканирования. В различных условиях воздействия поверхность образца приобретала цвет от светло-фиолетового до темно-красного.

При исследовании использовались методы:

- оптической микроскопии (микроскоп Zeiss Axio Imager A1M),
- профилометрии (профилометр Hommel Tester 8000),
- спектрофотометрии (микроскоп-спектрофотометр МСФУ-К),
- микрорамановского рассеяния (рамановский спектрометр Renishaw InVia).

**Феноменологическая модель процесса.** Структура образующихся на поверхности металла или сплава оксидных пленок определяется термодинамическими и кинетическими процессами, в том числе температурой и продолжительностью нагрева. Известно, например, что при снижении температуры, но с повышением времени нагрева возможно образование той же оксидной пленки, что и при большей температуре нагрева, но при меньшем времени воздействия [2].

Особенности процесса лазерного нагревания поверхности стали в приведенных условиях могут быть проанализированы в рамках одномерной задачи теплопроводности [3], поскольку диаметр облучаемой области  $d=50$  мкм существенно больше глубины проникновения теплового потока в глубь образца в течение лазерного импульса  $\sqrt{a\tau} = 1,4$  мкм,  $d \gg 2\sqrt{a\tau}$ , где  $a$  — коэффициент температуропроводности (для нержавеющей стали  $a=0,21$  см<sup>2</sup>/с).

С учетом одномерности процесса для определения температуры поверхности образца можно рассмотреть процесс облучения сканирующим пучком лазера следующим образом. Область поверхности образца характерного размера  $d$  подвергается воздействию  $n$  импульсов, которые лазер генерирует с частотой  $f$  в течение времени смещения сканирующего пучка лазерного излучения на расстояние, равное  $d$ , при скорости сканирования  $V$ . Таким образом, имеем:

$$n = fd/V, \quad (1)$$

тогда можно считать, что элемент поверхности образца диаметром  $d$  подвергается воздействию серии импульсов лазерного излучения общей длительностью  $d/V$  со скважностью  $(f\tau)^{-1}$ .

В соответствии с исследованием [4] относительное изменение температуры поверхности  $T_0$  образца в центре зоны при воздействии одного импульса может быть записано в виде

$$T_0 = \frac{2q(1-R)\sqrt{a\tau}}{\sqrt{\pi k}}, \quad (2)$$

где  $k=74,4$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> — коэффициент теплопроводности нержавеющей стали,  $R$  — коэффициент отражения лазерного излучения от поверхности образца.

Остаточная температура поверхности образца после воздействия  $(m-1)$ -го импульса серии с учетом выполнения условия (1) будет следующей:

$$T_m = T_0 \sqrt{f\tau} \sum_{n=1}^{m-1} \sqrt{\frac{1}{n}}. \quad (3)$$

Проведенные эксперименты показали, что возникновение одного и того же цвета (воспринимаемого невооруженным глазом) оксидных пленок на поверхности образца возможно

при различных режимах облучения. Для получения определенного цвета оксидной пленки, т.е. для активации некой окислительной реакции, необходимо достичь соответствующей пороговой величины плотности мощности лазерного излучения, а в конечном итоге — необходимой температуры поверхности. С другой стороны, важным фактором процесса является время воздействия лазерного излучения, или время нагрева поверхности, вследствие резкой нелинейной зависимости скорости роста оксидных пленок от температуры [2]. Параметром, характеризующим образование оксидной пленки той или иной структуры и цвета, должна являться некая интегральная характеристика, учитывающая температуру поверхности образца, создаваемую воздействием серии импульсов, и общее время нагрева.

Для оценки интегрального эффекта воздействия (окисления) с учетом одномерного процесса можно предложить следующую полуэмпирическую температурно-временную комбинацию  $\Phi$ :

$$\Phi \approx \Phi_1 + \Phi_2, \quad (4)$$

где  $\Phi_1 = T_0 N \tau$  — примерное (без учета теплопроводности) время поддержания температуры  $T_0$  в течение времени воздействия,  $\Phi_2 = T_0 \sqrt{f \tau} N \tau$  соответствует эффекту накопления тепла от предыдущих импульсов. Таким образом, в общем случае:  $\Phi \approx T_0 N \tau (1 + \sqrt{f \tau})$ .

Если частота обратно пропорциональна импульсной мощности, как в „МиниМаркере™-М10“, комбинация (4) преобразуется к виду

$$\Phi \approx T_0 N \tau + \frac{1}{f} \sum_{m=1}^n T_m. \quad (5)$$

Расчеты, проведенные для большого количества экспериментов, показывают, что каждому цвету оксидных пленок, образующихся на поверхности образцов, соответствует определенное значение параметра  $\Phi$ .

В ходе экспериментов было также отмечено, что поверхности одинакового цвета получаются при одном и том же значении коэффициента перекрытия  $S$ :

$$S = d - l = d - \frac{V}{f}, \quad (6)$$

где  $l$  — расстояние между центрами двух соседних пучков.

На рис. 1 проиллюстрирована роль перекрытия при выборе режимов лазерного излучения:  $a$  — нулевое перекрытие;  $b$  — трехкратное.

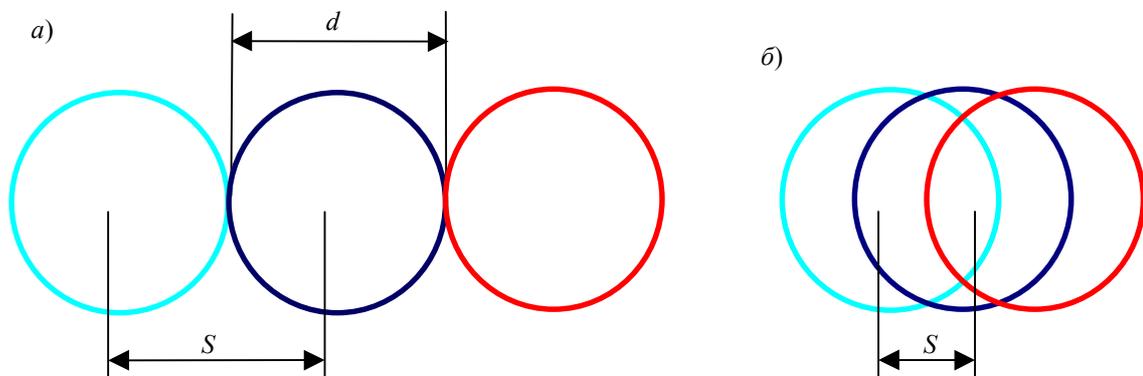


Рис. 1

Таким образом, коэффициент перекрытия — это второй параметр, который явным образом влияет на цвет образца. Результаты расчетов по формулам (1)—(5), проведенные для

режимов облучения образцов из нержавеющей стали, сведены в таблицу. В проведенных расчетах розовому, голубому и коричневому цвету соответствовал относительный разброс величины  $\Phi$  не более 5 % и  $S$  не более 0,1 %.

Цвет поверхности образца	$P$ , Вт	$V$ , мм/с	$f$ , кГц	$\Phi$ , К·с	$S$ , мкм	$\Delta\Phi$ , %	$\Delta S$ , %
Розовый	5	30	90	22,7	49,67	0,17	0,06
	5	30	99	22,74	49,7		
Голубой	6	60	70	9,15	49,1	9,5	0,2
	5	50	60	10,11	49,2		
Светло коричневый	9	150	30	3,11	45	1,9	0
	5	100	20	3,17	45		

**Экспериментальные результаты.** При воздействии сканирующего излучения лазера однородный цвет поверхности наблюдался невооруженным глазом на всем поле облученного образца. В результате микроскопического исследования модифицированной поверхности образца была установлена неоднородность окраски образованных оксидных пленок, аналогичная полученной в работе [5]. Например, поверхность розового цвета была образована оксидными пленками голубого цвета на дне кратера и ярко-розового — ближе к краю кратера. Тем не менее многократные эксперименты показали воспроизводимость наблюдаемого невооруженным глазом цвета модифицированной поверхности.

Чтобы доказать идентичность двух полученных цветов при разных режимах обработки, но с одинаковыми параметрами  $\Phi$  и  $S$ , была исследована шероховатость облученных поверхностей  $R_a$ , сняты их спектры отражения  $R$  (рис. 2) и изучены их микрофотографии (рис. 3 — см. 3-ю полосу обложки). Рис. 2, а:  $V = 30$  мм/с,  $P = 5$  Вт, 1 —  $f = 99$  кГц, 2 —  $90$  кГц; б: 1 —  $f = 20$  кГц,  $V = 100$  мм/с,  $P = 5$  Вт, 2 —  $f = 30$  кГц,  $V = 150$  мм/с,  $P = 9$  Вт. Рис. 3, а:  $f = 90$  кГц,  $V = 30$  мм/с,  $P = 5$  Вт,  $R_a=0,21$ ; б:  $f = 99$  кГц,  $V = 30$  мм/с,  $P = 5$  Вт,  $R_a=0,22$ ; в:  $f = 30$  кГц,  $V = 150$  мм/с,  $P = 9$  Вт,  $R_a=4,9$ ; г:  $f = 20$  кГц,  $V = 100$  мм/с,  $P = 5$  Вт,  $R_a=5,2$ .

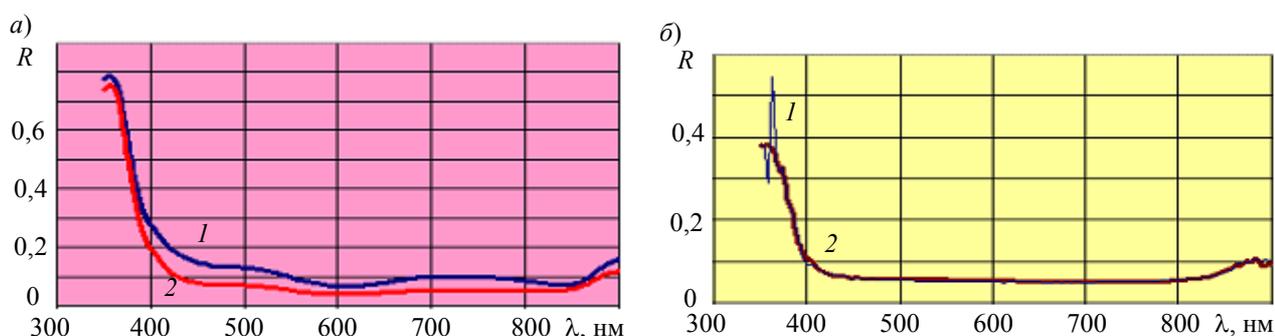


Рис. 2

Как видно из рис. 2 и 3, образцы, обработанные при одинаковых значениях  $\Phi$  и  $S$ , но разных  $P$ ,  $V$  и  $f$ , имеют схожий цвет поверхности. Из многочисленных экспериментов следует, что чем меньше разброс величины  $\Phi$  и  $S$ , тем более близки результаты воздействия при различной шероховатости поверхности, спектры отражения и визуально воспринимаемый цвет микроскопической поверхности.

Чтобы доказать, что цвет поверхности обусловлен появлением тонких диэлектрических пленок, было измерено рамановское рассеяние на микрорамановском спектрометре Renishaw InVia. На рис. 4 приведен пример спектра рамановского рассеяния ( $\Omega$ ) при  $P = 9$  Вт,  $V = 30$  мм/с,  $f = 99$  кГц;  $A$  — относительный отсчет. Предварительно установлено, что максимум соответствует буро-красному оксиду железа  $Fe_2O_3$ . Этот максимум присутствует во всех образцах при различных параметрах  $P$ ,  $V$  и  $f$ .

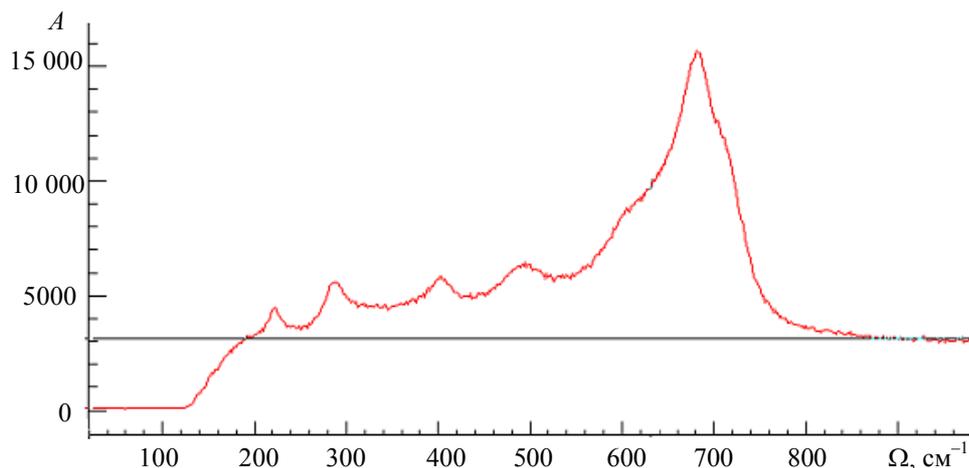


Рис. 4

**Выводы и рекомендации.** Проведенные эксперименты подтверждают возможность управления цветом изображения на поверхности нержавеющей стали, полученного в результате окисления металла под действием лазерного излучения. Несмотря на сложную микроструктуру поверхности цвет образцов имеет однородный (для невооруженного взгляда) оттенок на большом поле маркировки (до  $100 \times 100$  мм).

Эффект окрашивания поверхности металла при воздействии лазерного излучения может быть вызван двумя процессами. Наиболее вероятным является образование тонких диэлектрических пленок, скорее всего оксидных, как следует из рамановских спектров рассеяния облученной поверхности, хотя, в принципе, не исключено также образование нитридов и других соединений. Для стали различия в составе, влияющие на цвет оксидной пленки, определяются в основном процентным содержанием оксидов железа —  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Появление тонких диэлектрических пленок, безусловно, является главной причиной окрашивания гладкой поверхности. Однако при реальных значениях плотности световых потоков сканирование лазерным пучком приводит к образованию на краях зоны валика и других следов застывшего расплава, что вызывает появление регулярной шероховатости поверхности. Об этом свидетельствует также влияние коэффициента перекрытия  $S$  на результат воздействия. Поэтому необходим также анализ влияния дифракционных эффектов на цвет изображения.

Результаты исследований показали, что для получения на поверхности нержавеющей стали изображения определенного цвета необходимо выбирать режим работы установки таким образом, чтобы обеспечить соответствующее значение параметра  $\Phi$  с разбросом не более 5 % и перекрытия  $S$  — с погрешностью менее 0,1 %.

Отметим, что для получения устойчивых однородных цветовых покрытий необходима стабилизация параметров лазерного излучения. Результаты воздействия могут зависеть от шероховатости поверхностей образца, изготовленных из одного и того же материала. На образование цвета также заметно влияют влажность и температура окружающей среды.

Следует также отметить, что возможно получение цветных оксидных пленок под действием как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения, и на других металлических поверхностях, например — титане, цирконии и др. Протекающие при этом физико-химические процессы и технологические особенности в целом схожи с описанными в настоящей статье.

Авторы выражают большую благодарность за помощь в проведении экспериментов сотрудникам компании „Лазертех“, в особенности М. Прохорову, а также сотрудникам СПбГУ ИТМО А. Откеевой, О. Юльметовой, Э. Агееву и А. Петрову.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-02-01065а и государственного контракта № П1134.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МиниМаркер // Лазерный центр. [2004—2010] [Электронный ресурс]: <<http://www.newlaser.ru/laser/lc/minimarker.php>>.
2. Окисление металлов / Под ред. Ж. Бенара. М.: Металлургия. 1969. Т. 2. 444 с.
3. Горный С. Г., Григорьев А. М., Патров М. И., Соловьев В. Д., Туричин Г. А. Специфика поверхностной обработки металла сериями лазерных импульсов наносекундной длительности // Квант. электрон. 2002. № 10(32). С. 929—932.
4. Veiko V. P., Metev S. M. Laser assisted microtechnology. Heidelberg: Springer. Verlag, 1994.
5. Алексеев С. Б., Орловский В. М. и др. Формирование микроскопических цветных оксидных точек на поверхности титановой фольги при воздействии лазерного излучения // Квант. электрон. 2003. № 12(33). С. 1101—1106.

**Сведения об авторах****Вадим Павлович Вейко**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; зав. кафедрой; E-mail: [veiko@lastech.ifmo.ru](mailto:veiko@lastech.ifmo.ru)

**Сергей Георгиевич Горный**

— канд. техн. наук; ООО „Лазерный Центр“, Санкт-Петербург; директор; E-mail: [sgorny@newlaser.ru](mailto:sgorny@newlaser.ru)

**Галина Викторовна Одинцова**

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; инженер; E-mail: [ogv-r@yandex.ru](mailto:ogv-r@yandex.ru)

**Михаил Иванович Патров**

— ООО „Лазерный Центр“, Санкт-Петербург; инженер; E-mail: [Michael.Patrov@mail.ioffe.ru](mailto:Michael.Patrov@mail.ioffe.ru)

**Константин Владимирович Юдин**

— ООО „Лазерный Центр“, Санкт-Петербург; главный технолог; E-mail: [nepalec@yandex.ru](mailto:nepalec@yandex.ru)

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

---

---

# ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И РЕСТАВРАЦИИ

---

---

УДК 621.38

Б. Ю. НОВИКОВ, Ю. В. ЧИКАЛЕВ, Е. А. ШАХНО

## ОЧИСТКА ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ ОТ ГРАФФИТИ

Рассматриваются возможности метода лазерной очистки для удаления разных видов краски, используемых для граффити, со строительных и облицовочных материалов. Исследования проводились с использованием волоконного Yb-лазера и CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия.

*Ключевые слова:* лазерная очистка, удаление краски, граффити, CO<sub>2</sub>-лазер, волоконный Yb-лазер.

**Введение.** Основными методами удаления краски с различных поверхностей (граффити, рисунки и надписи на стенах жилых домов и других построек) являются очистка под высоким давлением (пескоструйная очистка, использование моек высокого давления и др.), а также применение химически активных веществ. К сожалению, эти методы не всегда позволяют добиться качественной очистки, при их использовании может быть повреждена обрабатываемая поверхность, а сам процесс очистки может быть недостаточно экологически чистым.

Альтернативой этим методам может стать хорошо зарекомендовавший себя метод лазерной очистки [1—3].

С помощью лазерных технологий возможна очистка произведений искусства [4], очистка от радиоактивных загрязнений деталей атомных подводных лодок [5], скоростная очистка рельсов и многих других объектов самого различного назначения. Были проведены исследования по послойному удалению лакокрасочных покрытий с произведений живописи [6], старой краски с железнодорожных вагонов при ремонте [7], а также лазерной очистке анилоксовых валов во флексографии [8] (печать на упаковках, пластиковых пакетах) и др. Однако очистка поверхностей архитектурных и скульптурных объектов от различных типов краски обладает следующими особенностями: широкий спектр очищаемых материалов, требования, предъявляемые к производительности процесса и др.

**Выбор объектов исследования и условий обработки.** В качестве образцов очищаемых поверхностей были выбраны материалы, широко используемые для постаментов памятников и облицовки зданий (мрамор и гранит), а также наиболее распространенные строительные материалы (штукатурка, кирпич и сталь).

Рисунки, выполненные в стиле граффити, наносятся с помощью аэрозольных баллончиков с краской или с помощью перманентных маркеров. Большие картины, в которых нет незакрашенных областей, обычно нанесены именно с помощью аэрозольных баллончиков. Для исследований были выбраны следующие типы красок, составляющих основу аэрозоля: нитрокраска, синтетическая краска, битумная мастика. Исследовались изображения, нанесенные перманентным маркером.

Граффити обычно покрывают довольно большие площади. Следовательно, важна высокая производительность процесса лазерной очистки, кроме того, необходимо удалять слои краски достаточно большой толщины — порядка десятых миллиметра.

Для экспериментов были выбраны  $\text{CO}_2$ -лазер непрерывного действия (средняя мощность 24,4 Вт) и импульсный волоконный Yb-лазер (средняя мощность 6,7 Вт, длительность импульса 100 нс, частота следования импульсов 100 кГц).

При исследовании использовались двумерные сканирующие системы. Коэффициент перекрытия варьировался — для  $\text{CO}_2$ -лазера в широких пределах (до 0,998), для волоконного Yb-лазера был равен либо 0,5, либо 0,9. Площадь обработки составляла  $1 \text{ см}^2$ .

В экспериментах необходимо было определить оптимальные режимы очистки. Оптимальным можно считать режим, при котором наблюдалась максимальная очистка с сохранением структуры исходной поверхности обрабатываемого материала за наименьшее время с учетом теплофизических и оптических свойств исследуемых материалов и красок.

**Результаты экспериментов. Мрамор.** Воздействие на плиту, покрытую нитрокраской, осуществлялось с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера. Оптимальным оказался режим двукратного прохода (без перерыва между ними). При первом проходе на поверхности оставались продукты горения краски, при втором проходе они испарялись. В этом режиме обеспечивается удаление почти 100 % краски при сохранении качества полировки поверхности (см. рис. 1; этот и последующие рисунки помещены на 3-ю полосу обложки).

При воздействии излучения Yb-лазера в проведенных исследованиях добиться полной очистки мрамора от краски удалось при схожей скорости обработки, однако верхний полированный слой мраморной поверхности разрушался. Некоторые различия результатов экспериментов и режимов обработки на установках с волоконным и  $\text{CO}_2$ -лазером объясняются разными значениями коэффициента отражения для мрамора при  $\lambda = 1,06$  и  $10,6 \text{ мкм}$ .

**Гранит.** Исследовалась возможность очистки волоконным Yb-лазером гранитной поверхности от различных видов краски. Результаты оказались неудовлетворительными: один из компонентов гранита при нагреве лазерным излучением разрушался: образовывались неглубокие отверстия в черных областях камня (рис. 2). Плотность мощности, необходимая для удаления краски, оказалась достаточной для повреждения поверхности камня.

**Кирпич.** Была проведена серия экспериментов с кирпичом, покрытым старым слоем нитрокраски. Воздействие осуществлялось излучением как  $\text{CO}_2$ -, так и Yb-лазера. Удачных результатов удалось добиться в обоих случаях. Средняя мощность  $\text{CO}_2$ -лазера в 4 раза больше средней мощности волоконного лазера, однако производительность процесса в эксперименте с  $\text{CO}_2$ -лазером (рис. 3, а) оказалась в 7 раз выше, чем в эксперименте с волоконным лазером (рис. 3, б), что, по-видимому, объясняется различным показателем поглощения краски для разных длин волн лазерного излучения.

**Штукатурка.** Также были проведены эксперименты по очистке поверхности штукатурки от старой краски излучением волоконного Yb-лазера (рис. 4). Краска была успешно удалена, но скорость обработки оказалась наименьшей по сравнению со скоростью обработки других материалов.

**Сталь.** Исследовалась возможность очистки стальных поверхностей от различных красок. Наименьшей производительность была при очистке стали от чернил фиолетового маркера и битумной мастики. Производительность очистки от нитрокраски была в два раза выше, а от чернил черного маркера и синтетической краски — в шесть раз.

**Обсуждение результатов.** На основании проведенных экспериментов были сделаны выводы о возможности и порогах очистки различных материалов от красок, используемых для нанесения граффити. Параметры режимов обработки, при которых достигалась полная очистка, приведены в табл. 1 и 2. Режим характеризуется максимальной производительностью процесса ( $A$ ,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ); диаметром пятна ( $d$ , мм); количеством проходов ( $N$ , указано,

если выполнялись соответствующие эксперименты, в противном случае количество проходов равно единице); коэффициентом перекрытия ( $k$ ). Параметры излучения лазеров не изменялись (для  $\text{CO}_2$ -лазера: мощность 24,4 Вт, для Yb-лазера: мощность 6,7 Вт, длительность импульса 100 нс, частота следования импульсов 100 кГц).

Таблица 1

## Оптимальные режимы очистки от нитрокраски

Параметр	Мрамор			Сталь, Yb-лазер	Штукатурка, Yb-лазер	Кирпич	
	шлифованный, Yb-лазер	полированный, CO <sub>2</sub> -лазер	полированный, Yb-лазер			CO <sub>2</sub> -лазер	Yb-лазер
$A$	2,4	2,1	4,8	4,8	1,2	64	6
$d$	0,5	0,43	0,5	0,5	0,5	0,6	1
$k$	0,9	0,997	0,5	0,9	0,5	0,92	0,5
$N$		2				2	1

Таблица 2

## Оптимальные режимы очистки от различных видов краски

Материал	Синтетическая краска	Мастика	Черный маркер	Фиолетовый маркер
Мрамор (шлифованный, Yb-лазер)	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$ $N = 2$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$
Мрамор (полированный, Yb-лазер)	$A = 4,8$ $d = 0,5$ $k = 0,5$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,5$	$A = 4,8$ $d = 0,5$ $k = 0,5$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,5$
Сталь (Yb-лазер)	$A = 14,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$	$A = 14,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$	$A = 2,4$ $d = 0,5$ $k = 0,9$

Результаты исследований позволили выявить следующие закономерности:

— значения плотности энергии, необходимые для удаления различных красок со стального образца, различаются не более чем в 6 раз (от 0,93 до 2,8 Дж/мм<sup>2</sup>);

— для повышения качества очистки рекомендуется применять режим двух и более проходов;

— при лазерной очистке поверхности мрамора излучением Yb-лазера структура полированной поверхности нарушается, тогда как в случае с  $\text{CO}_2$ -лазером этого не происходит;

— производительность лазерной очистки штукатурки от краски оказалась наименьшей.

Проведенные исследования показали возможность использования метода лазерной очистки для удаления разных видов краски с поверхностей мрамора, кирпича, стали и штукатурки. Проблематичной и требующей дальнейших исследований оказалась лазерная очистка поверхности гранита. Для широкого применения лазерной очистки поверхностей от граффити необходимо увеличение производительности обработки, что может быть достигнуто использованием более мощных мобильных лазерных систем.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № П968.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siano S., Giamello M., Bartoli L., Mencaglia A., Parfenov V., Salimbeni R. Laser Cleaning of Stone by Different Laser Pulse Duration and Wavelength // Laser Physics. 2008. Vol. 18, N 1. P. 27—36.
2. Вейко В. П., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н., Шахно Е. А. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 30—36.

3. Шахно Е. А. Физико-технические основы лазерной обработки систем пленка-подложка. Дисс. ... д-ра техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский гос. ин-т точной механики и оптики, 2002. 284 с.
4. Abraham M., Twilley J. A Review of the State of the Art of Laser Cleaning in Conservation. National Center for Preservation Technology & Training. 1997.
5. Вейко В. П., Шахно Е. А., Смирнов В. Н., Мясковский А. М., Боровских С. С., Никишин Г. Д. Лазерная дезактивация металлических поверхностей // Оптик. журн. 2007. № 8. С. 33—36.
6. Melessanaki K., Stringari C., Fotakis C., and Anglos D. Laser Cleaning and Spectroscopy: A Synergistic Approach in the Conservation of a Modern Painting // Laser Chemistry. 2006. Vol. P. 42 709.
7. Смирнов В. Н. Разработка технологии лазерной очистки крупногабаритных металлоконструкций, в том числе железнодорожных вагонов, от краски и ржавчины // Мобильные лазерные системы [Электронный ресурс] <[http://laser.com.ru/refinement\\_coach.html](http://laser.com.ru/refinement_coach.html)>.
8. Тараненко Д. Очистка анилоксовых валов — настоящее и будущее // Флексо Плюс. 2003. № 1.

#### Сведения об авторах

**Борис Юрьевич Новиков**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;  
E-mail: novikov-bu@yandex.ru

**Юрий Владимирович Чикалев**

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: guitarrista@mail.ru

**Елена Аркадьевна Шахно**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;  
E-mail: shakhno@lastech.ifmo.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

УДК 621.38;655.021

А. А. САМОХВАЛОВ, М. В. ЯРЧУК

## ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА РАСТРИРОВАННЫХ ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ ВАЛОВ

Разработана технология сухой лазерной очистки растрированных полиграфических валов от различных типов краски. Экспериментально подтверждена безопасность данного способа удаления загрязнений для различных микрорельефов керамического покрытия растрированных валов.

**Ключевые слова:** флексография, растрированный (анилоксовый) вал, лазерная очистка, волоконный лазер, термомеханический эффект.

**Введение.** Растрированный (анилоксовый) вал — цилиндр, имеющий ячеистую равномерно гравированную поверхность (микрорельф), который используется во флексографской печатной машине для переноса краски на печатную форму. Флексография на данный момент — единственный способ печати, применение которого расширяется в упаковочном, этикеточном и газетном производстве благодаря высокой рентабельности.

Полиграфисты считают анилоксовый вал „сердцем“ печатной машины, помимо того данная деталь является самой дорогостоящей во флексографической машине. На рис. 1 представлен печатный аппарат флексографической печатной машины: растрированный (анилоксовый) вал 1, погруженный в красочный ящик 2, наносит слой краски на печатную форму 3, смонтированную на формном цилиндре 4. Контакт запечатываемого материала 5 с формой 3

обеспечивается печатным цилиндром 6, краска переносится на подложку, на выходе получается оттиск 7. Излишки краски снимаются ракелем 8.

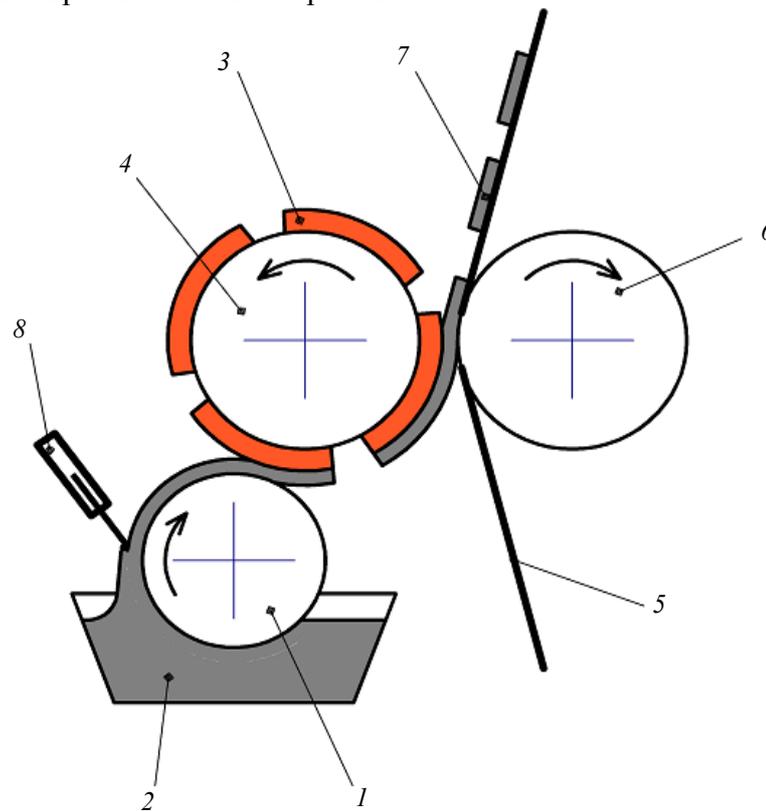


Рис. 1

Переносить краску растрированный вал может благодаря своему микрорельефу, созданному лазерным гравированием. Микрорельеф выполняет роль „красочных карманов“: при вращении вала в красочном ящике ячейки захватывают краску и переносят ее на печатные элементы формы. Ширина ячейки может составлять от 10 до 100 мкм. Стоит отметить, что основной проблемой при эксплуатации растрированных валов является сохранение тонкой перемычки (рис. 2).

Залогом сохранения свойств поверхности и долгой его службы является ежедневная и глубокая очистка, первая выполняется в печатной машине, пока краска не успела засохнуть, второй вид очистки необходимо проводить не реже одного раза в неделю.

Оптическая плотность печатного оттиска напрямую зависит от количества краски, переносимой валом, определяемого глубиной гравировки, поэтому результат очистки растрированных валов определяет качество полиграфических услуг данного вида печати.

Современные способы очистки не позволяют удалять застарелую краску со дна ячеек анилоксосового вала, вследствие чего не восстанавливается уровень краскопереноса. Используя некоторые способы глубокой очистки, можно повредить поверхность вала — разрушить тонкие перемычки [1, 2]. Сформулируем требования к методу очистки растрированных валов:

— обеспечение глубокой очистки анилоксосового вала: сухие остатки красочного пигмента, смолы и др. вещества, оседающие на дне ячейки, должны полностью удаляться;

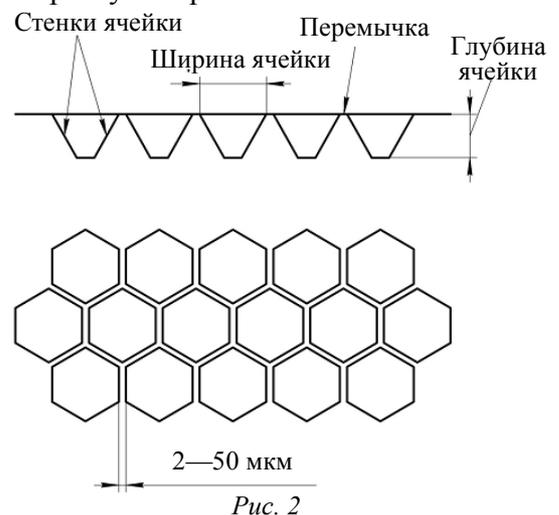


Рис. 2

- при очистке анилоксовый вал не должен быть поврежден;
- используемые средства очистки должны быть экологически безопасными;
- применение метода должно окупаться за счет продления срока службы растрированного вала.

**Режимы лазерной очистки анилоксовых валов.** Наиболее эффективным для удаления тонких слоев загрязнителя, как с точки зрения производительности, так и с точки зрения энергетической, является многоимпульсный режим лазерной очистки [3, 4]. Поэтому для очистки поверхности растрированного вала целесообразно использовать импульсный волоконный лазер, имеющий широкий диапазон перестройки частоты следования импульсов ( $f=20—100$  кГц) и высокое качество пучка  $M^2=1,1$ ; кроме того, полиграфические краски хорошо поглощают ближнее инфракрасное излучение (для  $\lambda=1,06$  мкм коэффициент поглощения  $\sim 0,8$ ).

Наименьшие повреждения поверхности достигаются при термомеханическом режиме лазерной очистки [4]. На сегодняшний день моделей термомеханической очистки не разработано, но можно сделать некоторые оценки, необходимые для построения технологического процесса.

Для удаления краски необходимо нарушение ее адгезии к поверхности анилоксового вала, что вызывается смещением частицы загрязнителя вследствие температурного расширения:

$$\delta = k \int_0^h \alpha T dy, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий характер нагрева загрязнителя ( $k=0,5$ , так как частица нагревается равномерно по толщине),  $h$  — толщина частицы (глубина ячейки растрированного вала),  $\alpha$  — коэффициент линейного температурного расширения,  $T$  — заданная температура частицы.

Значения теплофизических коэффициентов загрязнителя можно принять равными физико-химическим константам канифоли: теплоемкость —  $c = 2,16 \cdot 10^3$  Дж/кг $\cdot$ °С, теплопроводность —  $\lambda = 0,158 \cdot 10^{-1}$  Вт/м $\cdot$ °С, плотность —  $\rho = 1,07 \cdot 10^3$  кг/м $^3$ , коэффициент —  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-4}$  °С $^{-1}$ .

На дне ячеек растрированного вала скапливаются засохшее связующее вещество и пигмент полиграфических красок.

Температура кипения полиграфической краски составляет примерно 250 °С [5], вследствие термомеханического эффекта отрыв загрязнителя происходит в твердой фазе [4], поэтому можно считать, что заданная температура  $T$  не превышает 250 °С.

Подставляя в формулу (1)  $T$ , найдем смещение частицы:  $\delta=0,2$  мкм (пределы интегрирования взяты от 0 до 10 мкм, что соответствуют толщине удаляемого красочного слоя).

На основании заданной температуры (250 °С) возможно сделать оценку максимальной плотности мощности излучения  $q_{\max}$ . Для этого воспользуемся выражением для плотности мощности  $q_{\max}$  [6], необходимой для нагрева до температуры  $T$ :

$$q_{\max} = \frac{(T - T_n) \lambda \sqrt{\pi}}{2(1 - R) \sqrt{a \tau}}, \quad (2)$$

$T_n$  — начальная температура частицы.

Условие одномерности лазерной очистки анилоксовых валов хорошо выполняется для радиуса пятна 50 мкм и длительности лазерного импульса  $\tau = 100$  нс:  $r \gg \sqrt{a \tau}$ , где  $r$  — размер фокального пятна, мкм;  $a$  — температуропроводность, м $^2$ /с;  $\tau$  — длительность импульса, нс.

**Экспериментальные исследования.** Для проведения эксперимента по лазерной очистке анилоксовых валов была собрана лабораторная установка (рис. 3). Оптическая головка 2, состоящая из коллиматора и фокусирующего объектива 7, устанавливалась на координатный стол 1, который управлялся с помощью персонального компьютера 8. Таким образом можно было регулировать скорость и шаг сканирования вдоль растрированного вала 5 и обеспечивать настройку фокусного расстояния с точностью до единиц микрометров.

Вал 5 фиксировался в центрирующих конусах 6 и приводился во вращение от электродвигателя постоянного тока 4 через соединительную муфту 3, скорость вращения регулировалась напряжением от эталонного источника питания 9. В эксперименте использовался импульсный волоконный лазер мощностью 10 Вт.

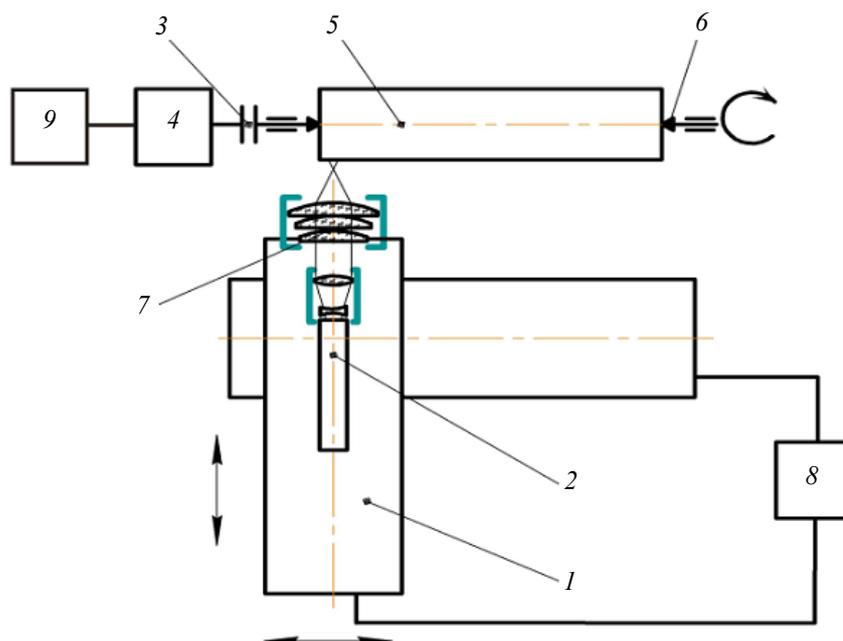


Рис. 3

Эксперименты были проведены для различных типов краски (УФ отверждающейся и спиртовой), очищаемые валы имели различный рельеф (ширину и форму ячеек). Эксперименты проводились с застарелой (более месяца) и свежей краской. На рис. 4 приведены результаты лазерной очистки: *a* — загрязненная область, *b* — очищенная; I — вал с размером по ширине ячейки 30 мкм (очистка от УФ-краски), II — вал с ячейкой 20×50 мкм (очистка от УФ-краски), III — вал с шириной ячейки 120 мкм (очистка от свежей спиртовой краски). Параметры эксперимента указаны в таблице (*q* — плотность мощности излучения, *f* — частота следования импульсов, *V* — линейная скорость вала, *d* — диаметр пятна, измерен по краске).

Вал	$q, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	$f, \text{ кГц}$	$V, \text{ м/с}$	$d, \text{ мкм}$
I	7	60	1,1	60
II	7	60	0,785	60
III	3,5	40	1,8	120

Отметим, что предоставленные для эксперимента анилоксовые валы имели трещины, для подтверждения безопасности лазерного способа очистки был сфотографирован один и тот же участок поверхности вала до и после эксперимента (рис. 4, I), как видно, количество трещин и их размеры не изменились.

Средняя производительность процесса, реализованного посредством лабораторной установки, составила 40 мм<sup>2</sup>/с. Частицы краски удалялись в твердой фазе, что существенно упрощает технологический процесс: вместо вытяжной системы возможно использовать абсорбирующую пленку.

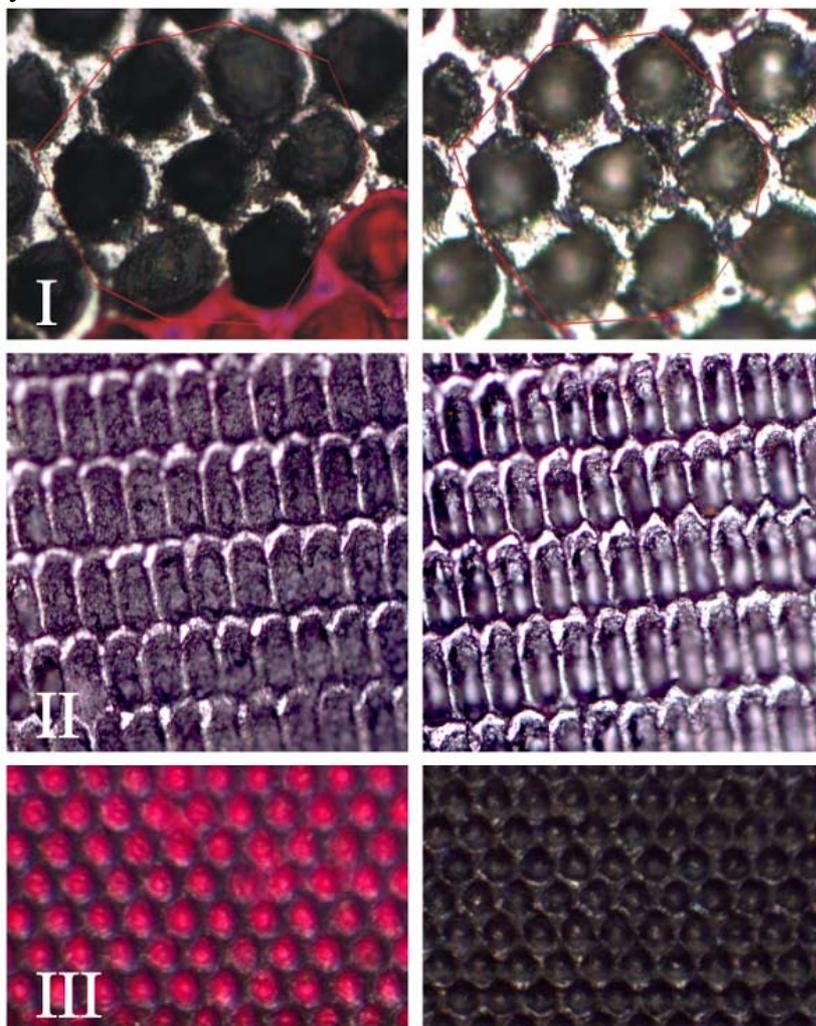


Рис. 4

**Заключение.** В настоящей работе экспериментально подтверждена эффективность и безопасность лазерной очистки растриванных валов. Разработанная технология очистки качественно превосходит существующие — удаляется краска со дна ячеек анилоксосового вала без разрушения микрорельефа. Технология экологически безопасна и позволяет проводить очистку в одну стадию.

Авторы выражают благодарность профессору В. П. Вейко за возможность проведения экспериментов.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № П968.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кенни Д. Чистые анилокси // Флексография и специальные виды печати. 2006. № 4.
2. Атkinson Д. Системы очистки анилоксосовых валов // Флексография и специальные виды печати. 2008. № 7.
3. Вейко В. П., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н., Шахно Е. А., Батице С. А. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 30—36.

4. Вейко В. П., Шахно Е. А. Физические механизмы лазерной очистки поверхности // Изв. РАН, сер. физическая. 2001. Т. 65, № 4. С. 584—587.
5. Новый справочник химика и технолога. СПб: Проффессионал, 2002.
6. Вейко В. П., Либенсон М. Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973.

<b>Андрей Александрович Самохвалов</b>	—	<b>Сведения об авторах</b> аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: andrugko@list.ru
<b>Михаил Владимирович Ярчук</b>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; младший научный сотрудник; E-mail: chukforyou@list.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

УДК 629.423.32:621.38

В. П. ВЕЙКО, А. А. ПЕТРОВ, А. С. МАЗНЕВ, А. М. ЕВСТАФЬЕВ, А. А. КАЛИНИНА

## ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Исследованы режимы лазерной очистки рельсового пути, показано, что коэффициент трения увеличивается на 30 %.

**Ключевые слова:** волоконный лазер, лазерная очистка, железная дорога.

**Введение.** При недостаточном сцеплении колес локомотива с рельсами, вызванном загрязнением поверхностей рельсов (измельченным песком, нефтепродуктами, опавшей листвой, обледенением), резко увеличивается расход электроэнергии, повышается износ поверхностей, могут возникнуть аварийные ситуации.

В настоящее время существует большое количество методов очистки рельсов — механическая, электроискровая, очистка с помощью воды под высоким давлением и др. Но существующие методы обладают рядом серьезных недостатков: возможны повреждения поверхности рельса, не все типы загрязнений могут быть удалены, не все методы могут быть использованы при отрицательных температурах. Оборудование имеет большие массогабаритные характеристики, поэтому подвижной состав не может быть им оснащен.

В последнее время в связи с появлением новых типов лазеров активно развиваются технологии лазерной очистки поверхностей от различных загрязнений [1, 2]. Одним из важнейших преимуществ лазерной очистки является минимальный дополнительный износ поверхностей. Впервые возможности лазера для очистки рабочей поверхности рельса были продемонстрированы в Великобритании [3], представленная система обладала значительными габаритами.

В настоящей работе исследуются возможности применения волоконного лазера для очистки рельса. Компактные системы на основе волоконных лазеров, обладающие низким энергопотреблением, могут быть установлены на любой тип локомотивов. Система может включаться автоматически либо по команде машиниста (ручное включение целесообразно при прохождении участков с заведомо ухудшенными условиями сцепления колеса с рельсом).

**Экспериментальные исследования.** Очистка проводилась с помощью экспериментальной установки на основе импульсного иттербиевого волоконного лазера, внешний вид которой приведен на рис. 1: 1 — коллиматор, 2 — лазерный излучатель и блок управления, 3 — система сканирования, 4 — объектив.

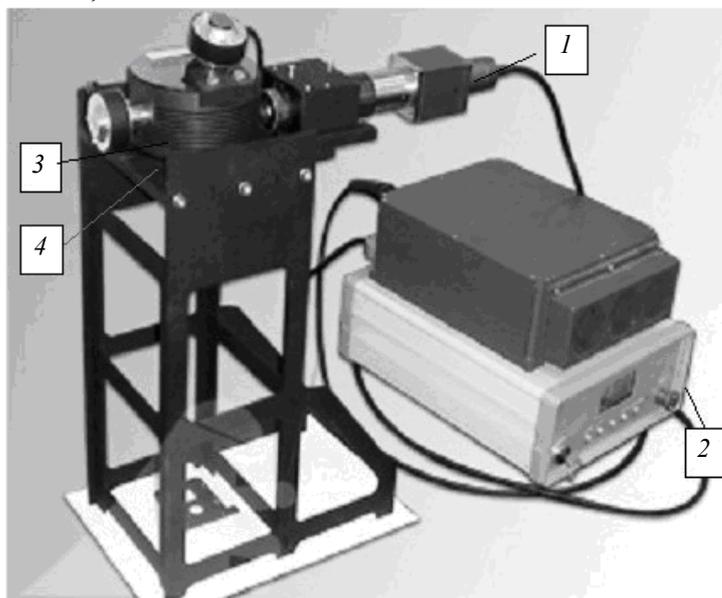


Рис. 1

Основные характеристики установки представлены ниже.

<b>Лазер</b>	
Тип .....	импульсный иттербиевый волоконный
Номинальная энергия в импульсе .....	1 мДж
Частота следования импульсов .....	50—100 кГц
Длина волны .....	1,06 мкм
Средняя номинальная выходная мощность .....	50 Вт
Длительность импульса .....	100 нс
<b>Сканатор</b>	
Область обработки .....	100×100 мм
Скорость перемещения пучка .....	10 м/с

Были проведены эксперименты по очистке поверхности рельсов от сухого и влажного грунта, машинного масла, смеси грунта с машинным маслом (толщина слоя до 1 мм). Органические загрязнения всех типов (листва, трава) были удалены. Неорганические включения в виде песка и мелких камней с поверхности рельса не удалялись, но при очистке комбинированного загрязнения в виде смеси машинного масла и песка масло было удалено. На рис. 2 представлен участок рельса с грунтово-масляным загрязнением до (а) и после (б) лазерной очистки.

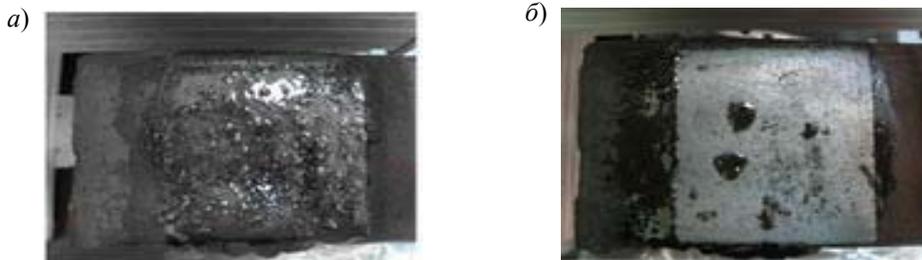


Рис. 2

Коэффициент трения  $\mu$  определялся по тангенсу угла наклона, при котором бандаж начинал скользить по рельсу с нанесенными на него различными образцами загрязнений. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Для оценки влияния лазерного нагрева на обрабатываемый материал, была определена температура в зоне обработки с помощью тепловизионной камеры FLIR Titanium 520 M, и измерена твердость рельса до и после лазерной очистки по методу Бринелля [4]. При использовании мощности лазерного излучения 20 Вт твердость не изменялась, при 50 Вт она увеличивалась с 363 до 393 НВ.

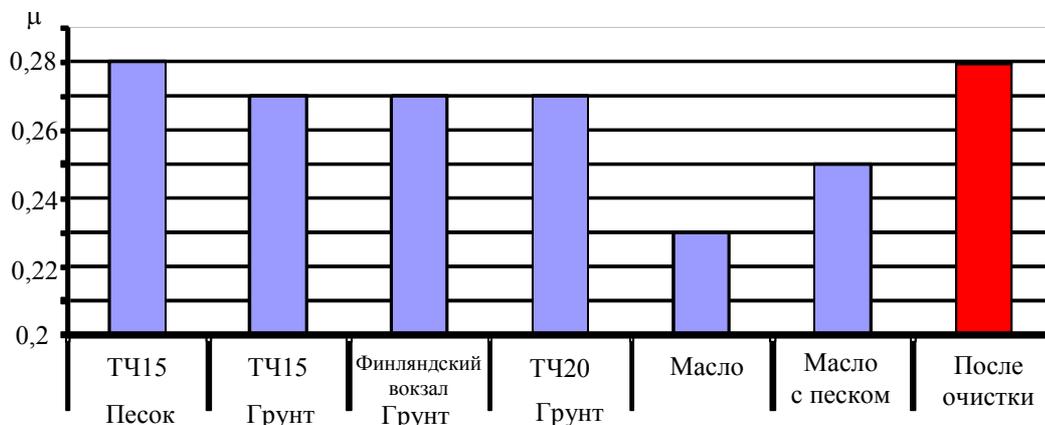


Рис. 3

Можно сделать вывод о том, что использование лазера для очистки поверхностей не оказывает существенного влияния на твердость материала.

**Расчет параметров режима лазерной обработки и производительности.** Для используемой лазерной установки был проведен расчет режимов обработки. Исходя из температуры нагрева поверхности, достаточной для эффективного удаления различных типов загрязнений, но не вызывающей структурных изменений в материале рельса ( $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), можно оценить необходимую плотность мощности, используя частный случай решения уравнения теплопроводности при  $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$  [5]:

$$q = \frac{(T - T_n)k\sqrt{\pi}}{2(1 - R)\sqrt{a\tau}}.$$

Здесь  $R$  — коэффициент отражения,  $k$  — теплопроводность. Пороговая плотность мощности составляет  $q = 1,6 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Для этой плотности мощности и указанных параметров лазерной установки диаметр пятна фокусировки  $r_0$  составляет 0,9 мм.

На основе полученных данных был проведен оценочный расчет производительности процесса лазерной очистки. В качестве исходных условий были приняты: указанные параметры лазерной установки, диаметр пятна фокусировки 0,9 мм, коэффициент перекрытия 5 %, ширина области обработки 60 мм. При данных условиях производительность установки составляет до 6 км/ч при сплошной обработке поверхности рельса. При использовании лазерного источника с частотой следования импульсов до 400 кГц и средней мощностью 200 Вт производительность может быть увеличена до 24 км/ч.

Повысить производительность процесса можно различными путями: увеличением энергии импульса и частоты следования импульсов лазера или уменьшением ширины обрабатываемой полосы.

**Заключение.** По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Лазерная очистка рельсов волоконным лазером со средней мощностью до 50 Вт эффективна для удаления различных типов загрязнений поверхности (грунт, нефтепродукты, органические загрязнения).

Тепловое воздействие при лазерной очистке не оказывает существенного влияния на материал. Температура в пределах области воздействия не превышает 370 °С, а средняя температура рабочей поверхности рельса менее 30 °С.

После лазерной очистки зафиксировано увеличение твердости поверхности на 30 НВ, полученное значение не является критическим и лежит в допустимых пределах изменения твердости рельсов.

Значение коэффициента трения после лазерной очистки увеличивается на 20—30 % по сравнению с исходным для всех типов загрязнений.

Теоретическая оценка показала, что на разработанной экспериментальной установке может быть достигнута производительность очистки до 6 км/ч. При увеличении мощности установки производительность может быть увеличена до 24 км/ч. Этот вывод требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Работа поддержана государственным контрактом РФ № П968.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daurelio G., Chita G., Cinquepalmi M.* Laser surface cleaning, de-rusting, de-painting and de-oxidizing // *Appl. Phys. A.* 1999. Vol. 69 [Suppl.]. P. 543—546.
2. *Chen X., Kwee T. J., Tan K. P., Choo Y. S., Hong M. H.* Laser cleaning of steel for paint removal // *Appl. Phys. A.* 2010. Vol. 101. P. 249—253.
3. *Ford R.* Laser railhead treatment shows promise // *Modern Railways.* 2002. Vol. 650, N 11. P. 16—18.
4. ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Введ. 2001-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2001. 27 с.
5. *Вейко В. П., Метев С. М.* Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд-во Болгарской АН, 1991.

#### Сведения об авторах

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; зав. кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Андрей Анатольевич Петров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: petrovandrey79@inbox.ru
- Александр Сергеевич Мазнев** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра электрической тяги; E-mail: el\_tyaga@mail.ru
- Андрей Михайлович Евстафьев** — канд. техн. наук, доцент; Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра электрической тяги; E-mail: evstam@mail.ru
- Анна Андреевна Калинина** — Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра электрической тяги; ассистент; E-mail: anya-c@mail.ru

Рекомендована программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию 08.09.10 г.

В. П. ВЕЙКО, С. А. ВОЛКОВ, Т. Ю. МУТИН, В. Н. СМИРНОВ

## О ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Приведены результаты использования метода спектроскопии лазерного факела для контроля качества очистки поверхностей. Предложена схема модельного эксперимента по определению коэффициента дезактивации с использованием нерадиоактивных изотопов наиболее часто встречающихся радиоактивных загрязнений.

**Ключевые слова:** лазерная очистка, лазерная дезактивация.

**Введение.** Лазерная очистка — наиболее высокотехнологичный способ удаления поверхностных загрязнений. Одной из важнейших областей применения лазерной очистки является дезактивация радиационно-загрязненных поверхностей деталей и конструкций атомных энергетических установок при их обслуживании или демонтаже. Эта технология дает возможность повторно использовать дорогие конструкционные материалы, стали и сплавы, применение ее на АЭС позволяет снижать радиационные нагрузки на персонал [1, 2].

Известно, что 95 % поверхностных радиоактивных загрязнений сосредоточено в тонком окисном слое, который можно удалить с помощью лазерного излучения [3]. Необходимо разрабатывать методы контроля химического состава поверхности в режиме реального времени, также требуется установить связь между удалением оксидов и снижением радиоактивности. В настоящей работе представлены результаты использования метода спектроскопии лазерного факела при решении задачи контроля качества очистки. Также предложена схема модельного эксперимента по определению коэффициента дезактивации с использованием нерадиоактивных изотопов наиболее часто встречающихся радиоактивных загрязнений.

**Постановка задачи.** Как известно [1], при лазерной очистке происходит испарение загрязнений либо их удаление за счет возбуждения в материале ударной волны.

В любом случае при взаимодействии лазерного излучения (с параметрами, характерными для процесса лазерной очистки) с металлом тонкий поверхностный слой быстро разогревается и возникает приповерхностная сопутствующая плазма, излучающая свет. Спектр излучаемого света несет информацию о химическом составе поверхности.

Заметим, что на спектральном анализе испаряемых с поверхности объекта атомов основан метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, ЛИЭС [5, 6], состоящий в возбуждении лазерной плазмы, последующей регистрации спектров ее излучения и их анализе (рис. 1,

1 — лазер, 2 — зеркало, 3 — объектив, 4 — образец, 5 — плазма, 6 — объектив, 7 — волокно, 8 — спектрограф, 9 — CCD-камера). Это явление можно использовать в целях контроля качества очистки [6].

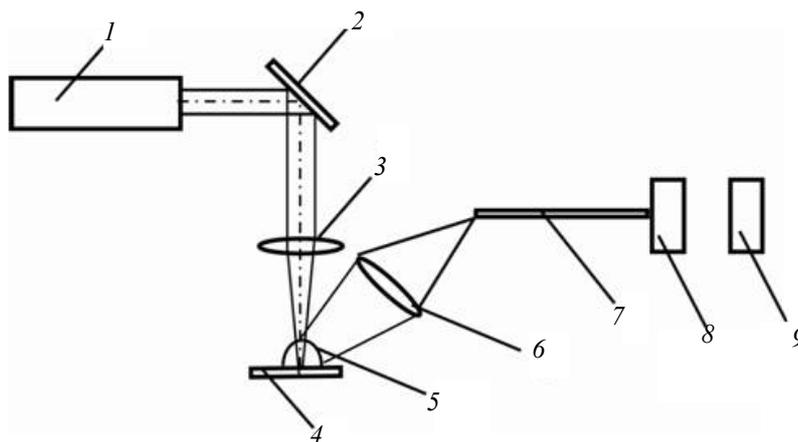


Рис. 1

**Экспериментальные исследования.** Способ контроля процесса лазерной очистки по спектрам сопутствующей плазмы был апробирован в ряде экспериментов с импульсным итербиевым волоконным лазером и спектрометром Red Tide USB650 с волоконным вводом излучения. Для оценочного моделирования параметров излучающего объекта лазерная искра регистрировалась с помощью скоростной фотосъемки. Чтобы исключить засветку камеры на длине волны лазерного излучения 1,07 мкм, был использован набор отрезающих ИК-излучение фильтров. Излучение импульсного волоконного лазера средней мощностью 10 Вт фокусировалось на поверхности металла в пятно диаметром 100 мкм. Длительность импульса составляла 200 нс, энергия — 0,5 мДж. Для управления излучением был использован гальванометрический сканатор, позволяющий построчно обрабатывать поверхность мишени с расстоянием между областями воздействия 300 мкм. Частота следования импульсов составляла 20 кГц, таким образом, камера с экспозицией 1 мс регистрировала в один кадр двадцать пространственно сдвинутых изображений плазмы с интервалом 50 мкс. Полученные фотографии представлены на рис. 2 (*а* — строка лазерных импульсов на поверхности мишени, *б* — пароголовый факел из области взаимодействия).



Рис. 2

Были сделаны следующие выводы: над областью взаимодействия лазерного излучения с материалом образуется плазма, включающая в себя продукты очистки. Температура газового факела достигает 4000—6000 К, что подтверждается расчетами. Экспериментальные и теоретические оценки параметров газа позволяют построить приближенную спектроскопическую модель источника излучения, соотносящую наблюдаемые спектральные линии с химическими элементами, их испускающими.

Основная идея спектрального контроля качества очистки металлов (в том числе и радиационно-загрязненных) заключается в том, что слой поверхностных примесей — загрязнений — содержит кислород, а основной материал кислорода не содержит [6, с. 169—174]. Эта идея получила также свое подтверждение в экспериментах [4] по очистке ряда металлов, используемых в электронной технике (Ag, Al, Cu, Fe, Nb, Mo, Ta, Ti, W), при помощи Nd:YAG-лазера (50 мДж, 12 нс) и спектроскопических исследований этого процесса при помощи компактного спектрометра SPM002 фирмы OPHIR.

Эксперименты [4] проводились таким образом, что во время каждого импульса очистки регистрировался спектр сопутствующей плазмы. Идентификация спектральных компонент в спектрах излучения плазмы показала, что наряду с ожидаемыми спектральными линиями основного элемента мишени и сильного сплошного фона, обусловленного возбуждением атмосферного азота, в спектрах на начальной стадии процесса очистки присутствуют линии кислорода O, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>.

На рис. 3 приведены зависимости отношения интенсивности излучения линий кислорода к интенсивности излучения линии основного элемента для мишеней из серебра и сильно окисленной меди от числа (*n*) очищающих лазерных импульсов. Видно, что начиная со 2-го

импульса очистки интенсивность излучения линий кислорода в сопутствующей плазме резко падает, т.е. уменьшается содержание этого элемента в мишени. Это также подтверждается как внешним видом объектов, так и их микроскопическим исследованием. Таким образом, зафиксировано значительное уменьшение интенсивности линий кислорода при повторной обработке. Полученные результаты позволяют создать методику оценки степени очистки поверхности (чаще всего это сильно корродированная сталь) от радиоактивных загрязнений по количеству кислорода в спектре факела, а также открывают перспективы для обратной связи при лазерной очистке.

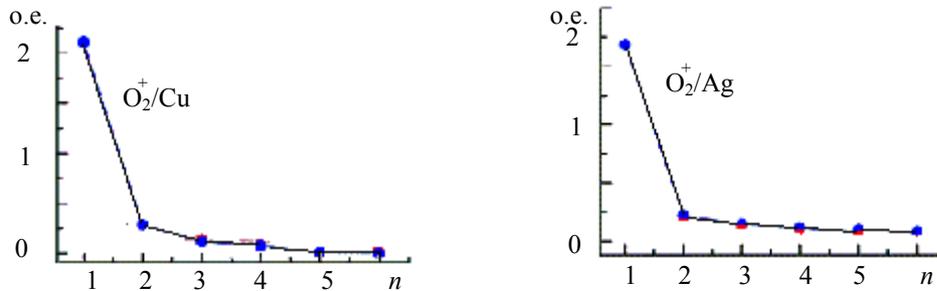


Рис. 3

**Обсуждение.** Спектральный мониторинг процесса лазерной очистки по сравнению с классической ЛИЭС осложняется двумя обстоятельствами.

1. Параметры лазера для очистки не всегда близки к тем, которые требуются для ЛИЭС, но поэтому задача расшифровки спектров „лазерной плазмы“ значительно усложняется.

2. Для очистки как для технологической задачи могут быть использованы комбинации различных лазеров, а также различные режимы их работы и дополнительные приемы (подогрев поверхности, сдвиг факела и т.д.) такие, что для мониторинга процесса могут потребоваться специальные „контрольные“ лазерные импульсы.

Для контроля степени очистки достаточно выявить различия в спектрах очищенной и неочищенной поверхности и создать спектральный фильтр, позволяющий фиксировать наличие или отсутствие выделенного набора спектральных линий в спектре.

Таким образом, возможна следующая схема лазерной очистки со спектральным контролем и управлением (рис. 4; 1—7 — то же, что на рис. 1, 8 — анализирующий фильтр). Вместо спектрального прибора используется спектральный фильтр и организуется канал оптоэлектронной обратной связи. Для создания такой системы потребуются предварительные эксперименты и калибровка, причем каждый конкретный случай очистки потребует создания своего фильтра.

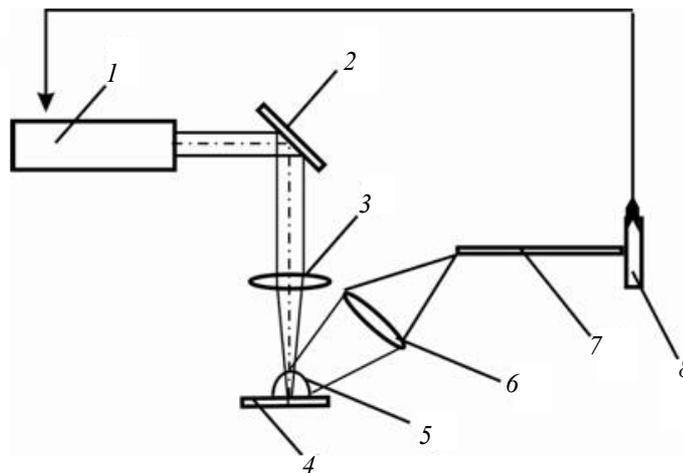


Рис. 4

Для уменьшения объема экспериментов с радиационно-загрязненными образцами можно предложить метод измерения коэффициента дезактивации без реальных радиоактивных загрязнений, например,  $^{133}\text{Cs}$ , причем наличие этих изотопов может быть также определено спектральными методами.

#### **Выводы.**

1. Показано, что степень очистки металлических поверхностей от окислов коррелирует с интенсивностью присутствующих в спектрах линий кислорода.

2. Возможно управление процессом лазерной очистки путем введения канала оптико-электронной обратной связи, в основу работы которой положен анализ спектров сопутствующей плазмы. Предложена схема такой обратной связи.

Работа поддержана государственным контрактом РФ № П968.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вейко В. П., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н., Никишин Г. Д., Шахно Е. А. Лазерная очистка и дезактивация металлических поверхностей: физические процессы и применения // Лазер-Информ. 2008. № 1—2. С. 376—377.
2. Никишин Г. Д., Стехин В. М., Смирнов В. Н. и др. Возможности применения лазерной дезактивации при утилизации оборудования ядерных энергетических установок. Владивосток, 2002.
3. Никишин Г. Д., Горынин В. И., Смирнов В. Н. и др. Применение лазерной дезактивации при утилизации АПЛ. Северодвинск, 2001.
4. Волков С. А., Лапшов С. Н. О возможности контроля процесса лазерной очистки по спектрам сопровождающей плазмы // XXXVII Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2010.
5. Вейко В. П., Шахно Е. А. Физические механизмы лазерной очистки // Лазерная очистка / Под ред. Б. С. Лукьянчука. 2002. С. 311—340.
6. Кремерс Д., Радziemски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. 2009.

#### **Сведения об авторах**

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; зав. кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Сергей Александрович Волков** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; старший научный сотрудник
- Тимофей Юрьевич Мутин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; младший научный сотрудник; E-mail: timofeymutin@yandex.ru
- Валентин Николаевич Смирнов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения

Рекомендована программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию 08.09.10 г.

И. К. МАЛКИЕЛЬ

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ ПРЕДМЕТОВ ИСКУССТВА

Показаны возможности лазерных технологий при реставрации предметов искусства, изготовленных из драгоценных металлов.

**Ключевые слова:** научная реставрация, лазерная очистка, лазерная сварка, лазерная полировка.

В мае 1978 г. в Ленинграде на территории фабрики „Восход“ (бывшей Невской обойной фабрики) был найден клад (217 предметов), позднее он был передан в Отдел истории русской культуры Государственного Эрмитажа. Клад состоял из разнообразных бытовых предметов. Серебряная утварь была изготовлена лучшими фирмами и мастерами Петербурга и Москвы, она датируется 1824—1910 годами.

Большинство столовых приборов украшены гравированными монограммами, юбилейными датами, благодаря таким деталям удалось установить, что найденная утварь принадлежала хозяевам Невской обойной фабрики Марии Ивановне и Василию Гурьевичу Лихачевым.

„Новый металл“ превратился в „археологический“ в результате почвенной коррозии и других неблагоприятных факторов [1—3], в частности, из-за пожара на некоторых предметах образовалась копоть, на металле появились следы „побежалости“, мастика выплавилась из полых ручек ножей и вилок. Под воздействием щелочей на серебре и железе образовались углубления и сквозные отверстия. Паяные швы сосудов, в лигатуре сплавов и припоев которых использовалась медь, разошлись. Золоченое серебро также потемнело вследствие пористости золотого покрытия и диффузии серебра. Некоторые предметы клада (ножи, лопатки и т.д.) изготовлены из нескольких материалов — серебра, кости и железа. После извлечения клада состояние железных предметов резко ухудшилось: изменившаяся влажность и доступ кислорода к разрушенному металлу привели к увеличению скорости коррозии. Практически все железные предметы окислились, поэтому клад был законсервирован.

Реставрация клада началась в марте 2008 года в Лаборатории научной реставрации драгоценных металлов Эрмитажа, когда появилась возможность применять передовые технологии и новейшее оборудование для лазерной очистки и сварки, трехмерное моделирование и быстрое прототипирование (рис. 1, 2). При реставрации столовых предметов (вилки и ножи), пустотелые ручки которых были заполнены специальной мастикой, применялись методы сухой ультразвуковой и лазерной очистки.

Отличительной особенностью археологического серебра является его хрупкость, обусловленная в основном межкристаллитной коррозией. Границы зерен металла обогащены легирующими компонентами и микропримесями, которые в почве превращаются в оксиды и соли, за счет чего и происходит ослабление связи между отдельными кристаллитами, в результате серебро становится хрупким. Особенно хрупкими были сложносоставные штампованные изделия, в которых металл был нагартован.

Эрмитаж первым в России применил при реставрации лазерную сварку последнего поколения, которая отвечает всем музейным требованиям. После появления на рынке реставрационного оборудования лазерной установки, которая позволяет сваривать сложные детали (от тончайшей филигранны до толстостенных предметов) появилась возможность реставрировать уникальные предметы из драгоценных металлов.

До реставрации



После реставрации



Рис. 1

До реставрации



После реставрации



Рис. 2

Специально для Лаборатории научной реставрации драгоценных металлов итальянская компания “OROTIG” создала три уникальные адаптированные установки (см. таблицу).

**Параметры лазерной сварки серебра 84-й пробы**

Операция	Мощность излучения, кВт	Длительность импульса, мс	Частота следования импульсов, Гц	Диаметр сварного пятна, мм	Режим подачи аргона
Сварка	2,6—3,2	2,4—3,5	3—5	0,6—0,8	3—6
Заваривание пор	2,1—2,3	1,9—2,2	1—4	0,7—0,9	3—6
Сварка археологического серебра	1,1—1,6	1,2—1,5	0,5—3	0,6—0,9	6—9
Полировка швов	3,4—3,8	3,2—4	9—20	1,1—1,5	0—3

Установки комплектуются микролифтами для работы с различными по габаритам предметами. Управление всеми процессами осуществляется с помощью джойстика. Концепция свободного движения, реализованная в установках, позволяет держать предмет в руках и регулировать сварочный процесс. В реставрационной практике крайне необходима тщательная регистрация всех процессов, поэтому в микроскоп встроена цифровая видеофотокамера, подключенная к компьютеру.

Сегодня лазерная очистка произведений искусства успешно применяется при реставрации шедевров во многих странах мира. Лазерной очисткой возможно без вреда для реставрируемого изделия удалять олово, медные, железные окислы и практически любые органические наслоения, которые иногда невозможно убрать с помощью традиционных химических реактивов. Сложнее всего удалить олово и мягкие припой с поверхности серебра и золота.

В Лаборатории научной реставрации драгоценных металлов Эрмитажа применяют лазерные установки двух типов: EOS 1000 LQS и Laser Mark-Uno, Open-Laser. Производители установок указывают режимы для выполнения операции очистки серебра 84-й пробы и археологического серебра от оксидно-сульфидных и хлоридных образований, органических наслоений, окислов меди и железа, позолоты от органики, окислов меди и железа, железа — от солей и продуктов коррозии, бронзы, латуни, меди от органических загрязнений и окислов, сплава олово-свинец — от органических загрязнений.

Оптоволоконный кабель позволяет проводить реставрационные работы на расстоянии до 10 м от установки. В некоторых случаях приходится применять химическую или механическую доработку.

Лучшие результаты по лазерной очистке были получены на всех установках компании OROTIG, в некоторых случаях особенно удачно очистка проходит после размягчения окислов и загрязнений специальными химическими реактивами.

Если лазерная очистка металлов ведется в режиме эксперимента, то лазерная сварка уже давно занимает ведущее место в реставрационной практике музеев мира. Больших успехов добились итальянские реставраторы, которые долгое время применяют в своей работе установки лазерной сварки [4]. Стыки, сваренные лазером, прочнее аналогичных стыков, спаянных горелкой или с помощью микроплазмы. Их прочность составляет 95 % от прочности цельного металла. Для проверки прочности сварных швов серебряных предметов была дана нагрузка, в 10 раз превышающая вес экспонатов.

Новая технология позволяет избежать использования припоев. В области сварного шва отсутствует окалина. Для полировки сварных швов применяется автоматическая пульсирующая система. Лазерные технологии позволяют производить сварку поверх ранее сваренных поверхностей, не повреждая предыдущий шов. Для работы с различными металлами (золотом, серебром, медными сплавами и железом) изменяются параметры лазерной сварки. При лазерной сварке не изменяется вес украшения, что крайне важно для музейной практики.

Возможности лазерной сварки проиллюстрированы на рис. 3 (стрелками указано направление распространения лазерного излучения).

Параметры лазерной сварки могут изменяться. Мощность установки зависит от многих условий: загрязнения воздушных фильтров, копоти на оптических фильтрах, калибровки и настройки оптических узлов и генератора. В зависимости от интенсивности работы необходимо регулярно проводить профилактический осмотр машины. Поэтому прежде чем начать реставрационные мероприятия, рекомендуется проверить режимы на опытных образцах.

В некоторых случаях после сварки фрагментов серебряных сосудов из-за линейных напряжений металл растрескивался в новых местах, что осложнило работу. Требовалось подобрать различные режимы сварки для разных элементов одного предмета. После сварки необходимо заполировать швы (т.е. уплотнить металл в месте сварки). Режим полировки требует увеличения диаметра сварочного пятна, частоты, мощности и длительности импульса. При толщине металла более 2 мм следует лазером „завалить“ края внутрь шва и, послойно нарастив металл (до лицевой поверхности экспоната), заполировать шов.

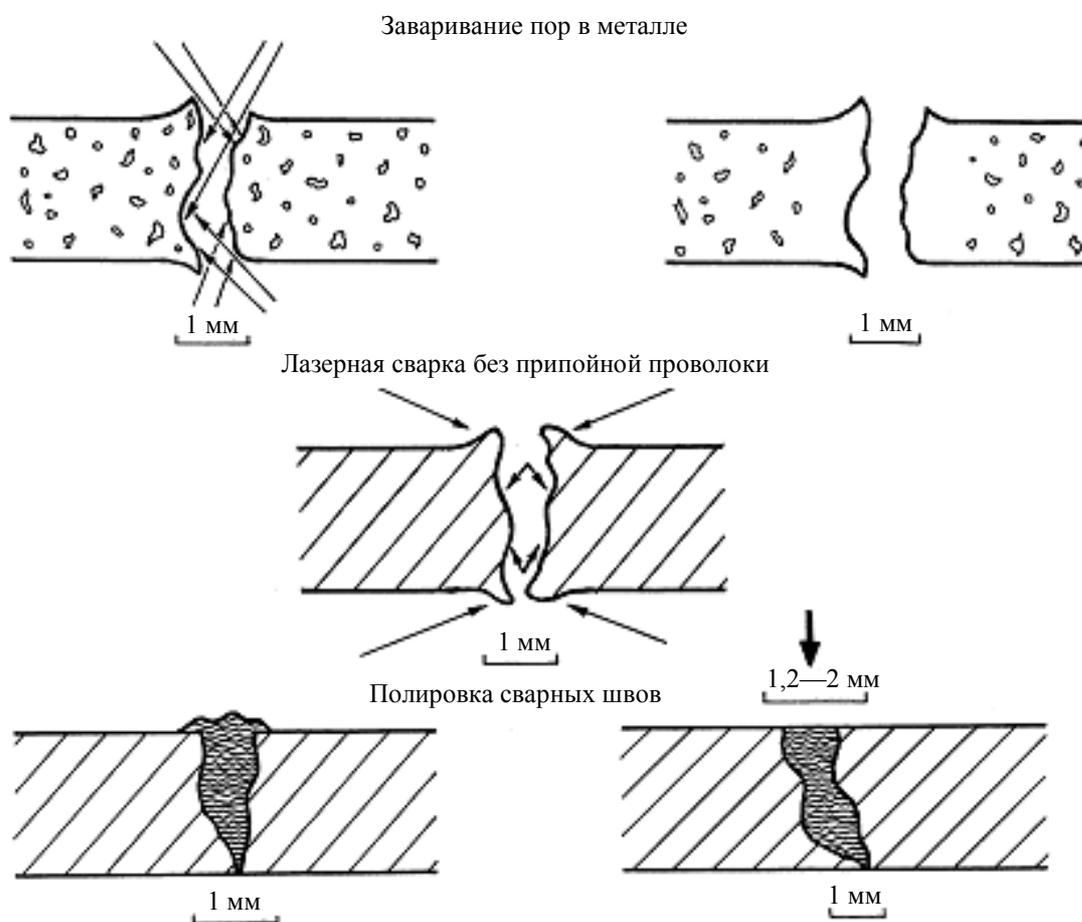


Рис. 3

Безусловно, применение лазерной сварки и лазерной очистки в музейной реставрации позволяет существенно сократить время реставрации и повысить качество работы. На рис. 4 представлены отреставрированные предметы найденного клада.

Полной теории реставрации драгоценных металлов до сих пор не разработано. Вероятно, сталкиваясь со сложными реставрационными случаями и большими комплексами изделий, можно постепенно разрабатывать отечественные методики, которые в дальнейшем помогут решать различные задачи.



*Рис. 4*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коварская С. Я.* Произведения московской ювелирной фирмы Хлебникова. М.: Московский Кремль, 2001. 120 с.
2. *Шемаханская М. С.* Реставрация металла: Метод. рекомендации. М.: ВНИИР, 1989. 154 с.
3. *Belluzzo P., Siano S., Pieri G., Lanterna G., Innocenti C.* Kermes: la rivista del restauro // LA RIVISTA DEL RESTAURO. 2007. N 67—68. P. 59—64.
4. *Abbate V., Innocenti C.* La sfera d'oro: il recupero di un capolavoro dell'oreficeria palermitana. Napoli: Electa, 2003. 165 p.

*Сведения об авторе***Игорь Карлович Малкиель**

— Государственный Эрмитаж, отдел Востока, Санкт-Петербург; зав. лабораторией научной реставрации драгоценных металлов

Рекомендована  
программным комитетом КонференцииПоступила в редакцию  
08.09.10 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

---

---

УДК 681.787

М. А. ВОЛЫНСКИЙ, Е. А. ВОРОБЬЕВА, И. П. ГУРОВ, Н. Б. МАРГАРЯНЦ

## БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ МИКРООБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ МАЛОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ И ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассмотрены основные характеристики методов интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии применительно к задачам исследований микрорельефа поверхности и внутренней микроструктуры различных материалов с высокой разрешающей способностью. Представлены примеры практического использования рассмотренных методов при исследованиях рельефа поверхности полимерного материала, внутренней микроструктуры материала бумаги и микроструктуры лакового слоя при оценке состояния предметов живописи для последующей реставрации с применением лазерных технологий.

*Ключевые слова:* бесконтактный контроль, микрообъекты, методы интерферометрии малой когерентности, оптическая когерентная томография.

**Введение.** Лазерные технологии широко используются для обработки и модификации поверхности различных материалов. При этом важное значение имеют методы диагностики характеристик материала до и после обработки с требуемыми разрешающей способностью и быстродействием.

В ряде случаев необходимо контролировать отклонения рельефа поверхности с разрешающей способностью в единицы микрометров при диапазоне отклонений до нескольких миллиметров. Для решения этой задачи возможно использовать бесконтактные методы интерферометрии малой когерентности, или интерферометрические радары [1, 2].

Для контроля внутренней микроструктуры частично прозрачных материалов, слоистых и случайно-неоднородных сред широко используются методы оптической когерентной томографии (ОКТ), основанные на принципах интерферометрии малой когерентности, применительно к рассеивающим излучение неоднородным средам (см., например, [3—5]).

При помощи интерферометрических радаров и оптических когерентных томографов проводят исследования материалов неорганической и органической природы, модифицированных под воздействием лазерного излучения [6], свойств биологических объектов [3—5], состояния ценных предметов искусства [7].

В статье рассмотрены основные характеристики методов интерферометрии малой когерентности и представлены примеры применения интерферометрических радаров и томографов для бесконтактной диагностики различных объектов.

**Методы интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии.** Принцип построения интерферометрических радаров и систем ОКТ основывается на формировании измерительной волны  $E_1$ , взаимодействующей с исследуемым объектом, и

опорной волны  $E_2$  при последующем сложении и квадратичном детектировании суммы двух волн  $E = E_1 + E_2$  (рис. 1). При этом возможно использовать различные методы формирования и регистрации интерферометрических сигналов.

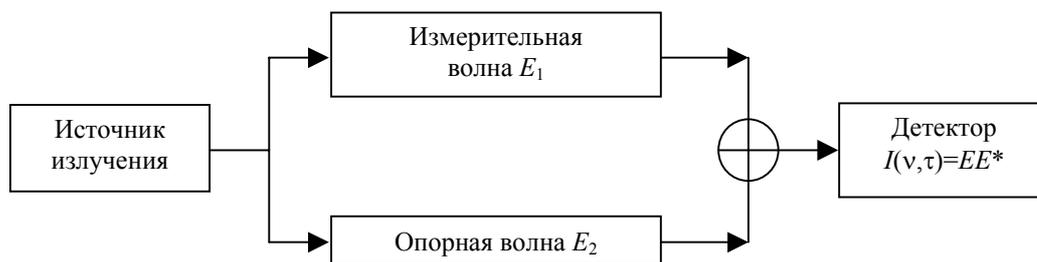


Рис. 1

На рис. 2 представлены упрощенные схемы интерферометров малой когерентности.

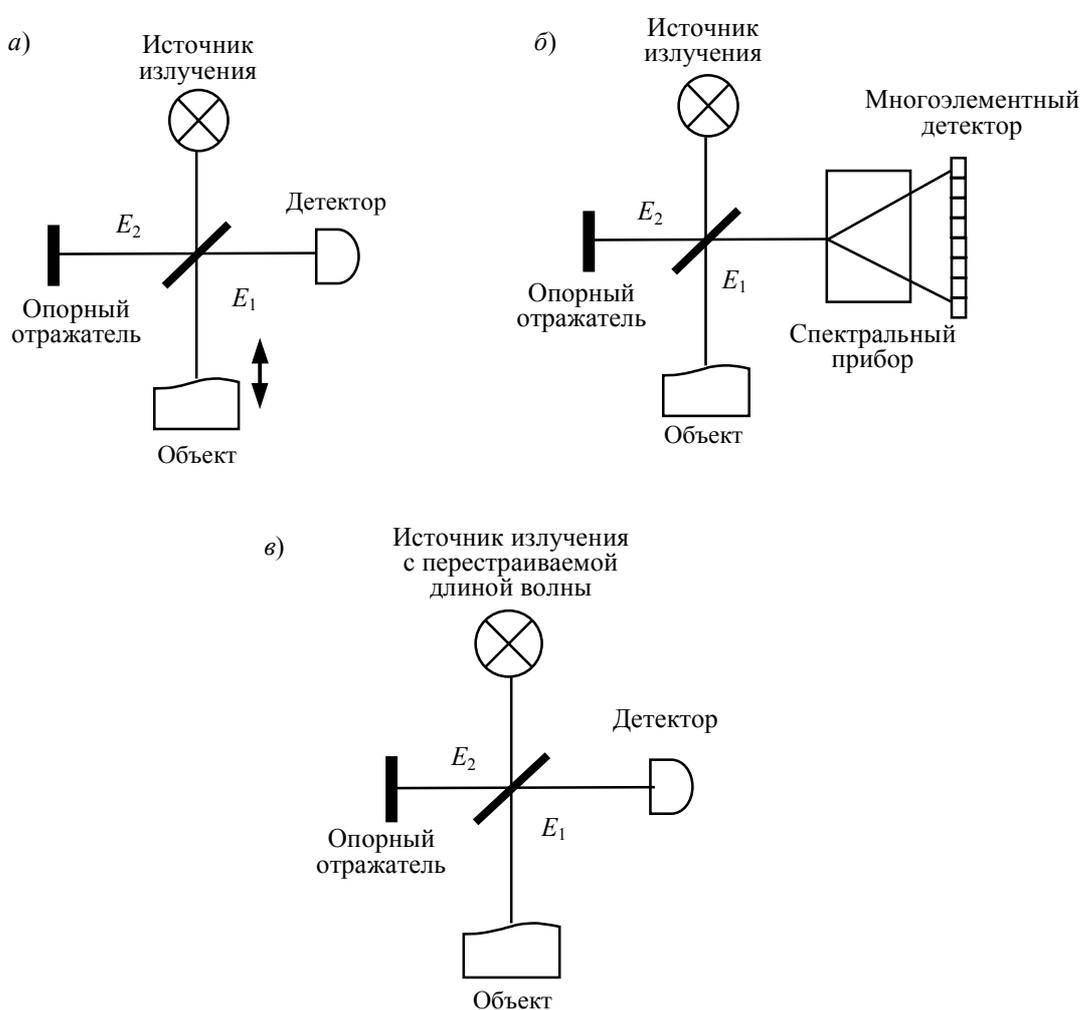


Рис. 2

В корреляционном интерферометре (рис. 2, а) осуществляют перемещение оптической системы относительно исследуемого объекта. При этом интерференционные полосы малой когерентности формируются в пределах длины когерентности излучения при интерференции части измерительной волны, отраженной от поверхности непрозрачного объекта или от слоя частично прозрачного неоднородного объекта, находящихся от светоделителя на расстоянии, равном оптической длине пути опорной волны.

В спектральном интерферометре (рис. 2, б) оптическая длина пути опорной волны не равна оптической длине пути измерительной волны для всего диапазона высот рельефа непрозрачного объекта или глубины частично прозрачного объекта. На выходе интерферометра размещен спектральный прибор, позволяющий определить составляющую отраженной измерительной волны для различных длин волн. При этом, используя преобразование Фурье спектра, зарегистрированного многоэлементным фотодетектором, можно определить расстояние и степень отражения от каждого слоя.

В случае использования источника когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны (рис. 2, в) разделение по длинам волн осуществляется во временной области вместо разделения в пространственной области (рис. 2, б).

Детально методы корреляционной и спектральной ОКТ исследованы в работе [8]. Рассмотрим основные особенности формирования и анализа сигналов в корреляционной и спектральной ОКТ.

Обозначим значения напряженности электрического поля измерительной и опорной волн в интерферометре как

$$E_1(v, t) = rE_0(v, t)H(v), \quad (1)$$

$$E_2(v, t, \tau) = (1 - r)E_0(v, t) \exp(-j2\pi v\tau), \quad (2)$$

где  $v$  — частота оптических колебаний,  $r$  — амплитудный коэффициент отражения в светоделителе,  $E_0(v, t) = A(v) \exp(-j2\pi vt)$  — оптические колебания источника излучения с амплитудным спектром  $A(v)$ ,  $H(v)$  — комплексная частотная характеристика исследуемого образца,  $\tau = \Delta/c$  — интервал времени сдвига измерительной волны по отношению к опорной при оптической разности хода  $\Delta = 2z$ ,  $c$  — скорость света,  $z$  — координата по глубине исследуемой среды.

Интенсивность излучения, регистрируемого на выходе интерферометра, определяется выражением

$$I(v, \tau) = \langle (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \rangle = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2 \operatorname{Re} \langle E_1 E_2^* \rangle. \quad (3)$$

Здесь угловые скобки обозначают усреднение во времени. Принимая интервал усреднения много большим периода световых колебаний и  $\kappa = 0,5$ , из соотношений (1)—(3) получим

$$I(v, \tau) = \frac{1}{4} G(v) |H(v)|^2 + \frac{1}{4} G(v) + \frac{1}{2} G(v) \operatorname{Re} \{ H(v) \exp(-j2\pi v\tau) \}, \quad (4)$$

где  $G(v)$  — спектральная плотность мощности излучения источника. Первое слагаемое в (4) описывает эффект фильтрации спектральной плотности мощности исходного излучения при взаимодействии с исследуемым образцом. При отсутствии спектрального поглощения в образце  $|H(v)|^2 = 1$ . Второе слагаемое соответствует спектральной плотности мощности излучения, отраженного в опорной ветви интерферометра. Третье слагаемое интерпретируется в зависимости от используемого метода формирования интерферометрических сигналов.

В корреляционном интерферометре это слагаемое характеризует интерференционные полосы при изменении времени задержки  $\tau$ , в спектральном — формирование спектра равного хроматического порядка в частотной области  $v$  при фиксированном значении  $\tau = \tau_j$  для каждого  $j$ -го слоя.

В корреляционном интерферометре все спектральные составляющие некогерентно суммируются, и результирующая интенсивность зависит только от времени задержки  $\tau$ , а именно

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu, \tau) d\nu = \frac{1}{4} I_0 [1 + 2 \operatorname{Re}\{V(\tau)\}], \quad (5)$$

где

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu)[1 + |H(\nu)|^2] d\nu, \quad (6)$$

$$V(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu)H(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой преобразование Фурье от произведения двух функций. В соответствии с известной теоремой о свертке с учетом взаимосвязи спектральной плотности мощности и корреляционной функции стационарных эргодических случайных процессов (теоремы Винера—Хинчина) это выражение можно представить для области независимой переменной в форме интеграла свертки

$$V(t) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau)h(t - \tau) d\tau, \quad (8)$$

где  $R(\tau)$  — автокорреляционная функция излучения источника.

Соотношение

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu) \exp(j2\pi\nu t) d\nu \quad (9)$$

можно интерпретировать как импульсный отклик исследуемого образца при освещении излучением в виде  $\delta$ -импульса.

Из (8) следует, что при использовании излучения с широким спектром (подобного некоррелированному шуму) и узкой автокорреляционной функцией  $R(\tau)$  функция видности интерференционных полос  $V(t)$  характеризует отклик исследуемого образца,  $V(t) \cong h(t)$ , а значит и его внутреннюю структуру, с высокой разрешающей способностью.

В спектральном интерферометре составляющие интенсивности (4) детектируются независимо на различных длинах волн за счет использования спектрального прибора и отдельных фотодетекторов для каждого выделяемого прибором спектрального интервала (см. рис. 2, б) либо за счет разделения сигналов спектральных составляющих во времени при использовании источника излучения с перестраиваемой длиной волны (см. рис. 2, в). При этом выражение (4) принимает вид

$$I(\nu, \tau) = \frac{1}{4} G(\nu)|H(\nu)|^2 + \frac{1}{4} G(\nu) + \frac{1}{2} G(\nu) \operatorname{Re}\{H(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau)\}. \quad (10)$$

При  $\tau = 0$  соотношение (10) аналогично выражению (7).

Проведенное выше рассмотрение методов формирования и регистрации интерферометрических сигналов в ОКТ позволяет сравнить их основные характеристики (см. таблицу).

Метод ОКТ	Разрешающая способность	Быстродействие	Основное преимущество
Корреляционный	Высокая	Ограниченное	Возможность фокусировки на каждом отдельном слое
Спектральный	Средняя	Повышенное	Не требуется механическое перемещение элементов устройства
Спектральный с перестраиваемой длиной волны	Средняя	Высокое	Возможность получения информации по всей площади исследуемого участка при использовании матрицы фотодетекторов

С помощью корреляционной ОКТ осуществляется послойное сканирование объекта по глубине, что позволяет обеспечить фокусировку зондирующего пучка в пределах длины когерентности излучения с использованием объектива с увеличенной апертурой и получить высокую разрешающую способность до 1 мкм по трем координатам (см., например, [9]). Однако послойное сканирование ограничивает быстродействие, главным образом за счет ограниченной пропускной способности регистрирующего электронного тракта [8].

В методах спектральной ОКТ интерферометрические сигналы регистрируются одновременно для всех слоев, поэтому требование к глубине фокусировки вносит ограничения на допустимые значения апертуры объектива, вследствие чего разрешающая способность таких систем в боковом направлении составляет примерно 10—20 мкм.

Преимущество спектральной ОКТ с перестраиваемой длиной волны состоит в возможности регистрации полезной информации по всему полю исследуемого участка (при использовании матрицы детекторов). Однако для быстродействующих перестраиваемых лазеров это преимущество в настоящее время не используется ввиду недостаточного быстродействия видеокамер приемлемой стоимости. При использовании линейки фотодиодов и аналоговой обработки интерферометрических сигналов достигается быстродействие до нескольких десятков  $B$ -сканов (томограмм в нормальных сечениях объекта по глубине) в секунду [10, 11], что соответствует телевизионному качеству отображения в режиме реального времени.

**Примеры практического применения методов интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии.** Методы бесконтактного контроля различных объектов с высокой разрешающей способностью позволяют оптимизировать режимы технологических процессов модификации или создания различных материалов.

На рис. 3 приведен пример поверхности полимерного материала (поликарбоната), модифицированной лазерным гравером, в виде полутоновой карты высот [6]. Рельеф поверхности восстановлен с использованием микроинтерферометра малой когерентности с длиной когерентности излучения около 1 мкм. Для участков, выделенных прямоугольниками, представлены соответствующие значения отклонений микрорельефа ( $z$ ).

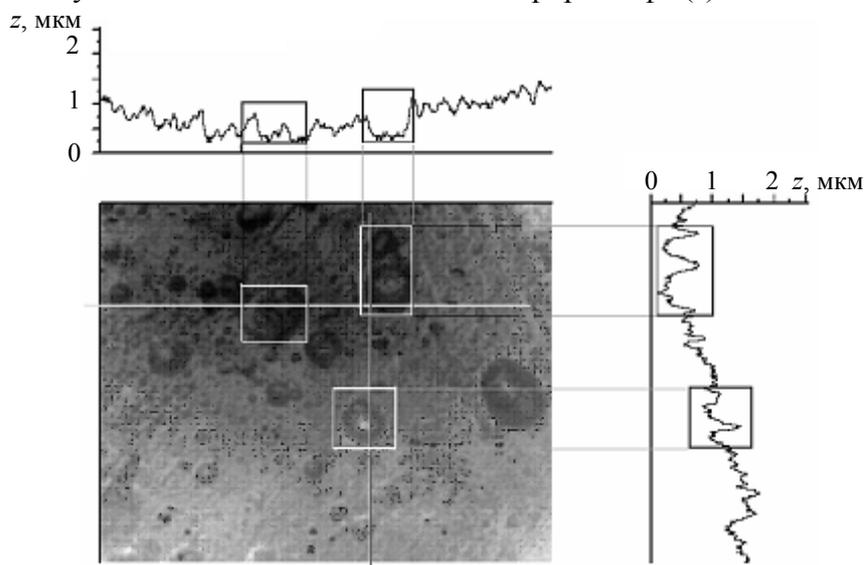


Рис. 3

Из рисунка видно, что метод характеризуется разрешающей способностью по высоте микрорельефа на субмикрометровом уровне, что позволяет оценить отклонения рельефа внутри областей, соответствующих пятну (диаметром 10—15 мкм) светового пучка лазерного гравера. Полученная информация дает возможность оптимизировать режим работы лазерного гравера для обеспечения требуемого воздействия на полимерный материал.

На рис. 4 представлен пример микротомограмм (*B*-сканов) бумаги [12], полученных при помощи оптического когерентного микроскопа с разрешающей способностью около 1 мкм по трем координатам. Томограммы рис. 4, *а*, *б* и *в*, получены для соседних параллельных сечений материала на расстоянии 5 и 20 мкм соответственно. Плотность материала бумаги составляла 9 г/м<sup>2</sup>. Размеры *B*-скана — 200 мкм в боковом направлении и 19 мкм по глубине.

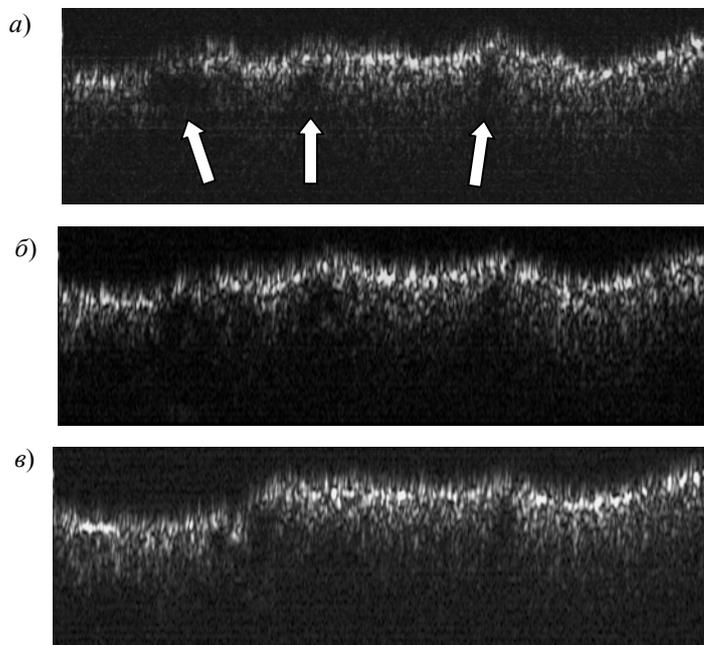


Рис. 4

На томограммах различимы отмеченные стрелками области с малой степенью отражения (микропоры в материале бумаги), которые расположены в близких положениях на рис. 4, *а*, *б* ввиду малого расстояния между сечениями, в отличие от сечения, показанного на рис. 4, *в*. Таким образом, показана возможность определения расположения микропор в материале бумаги, что представляет важную информацию с точки зрения оптимизации технологии производства.

Особое место среди объектов, изучаемых методом ОКТ, занимают предметы искусства, выполненные в технике масляной живописи, прежде всего, с целью изучения защитного слоя лака живописных работ [7, 13]. При использовании метода ОКТ возможно весьма точно определить толщину слоя лака, глубину областей отслаивания, изучить локальные трещины, а также выявить многослойные лаковые покрытия, которые выполнены в разное время с использованием лаков с различающимися физико-химическими свойствами.

На рис. 5 приведен пример исследования слоя лака методом спектральной ОКТ с пере-страиваемой длиной волны источника излучения [14]: *а* — трехмерная томограмма образца лакового покрытия с царапиной, подложкой служил картон; *б* — пример *B*-скана (ширина скана 6 мм). Толщина лака около 80 мкм.

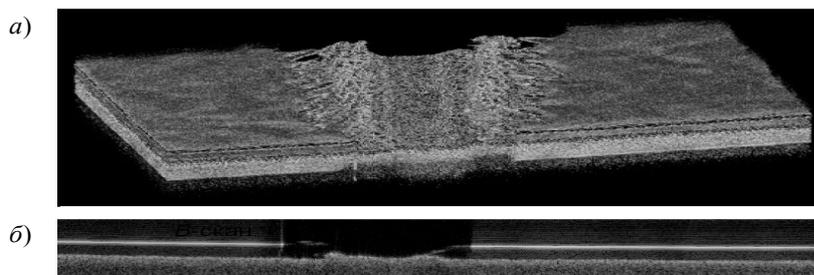


Рис. 5

Полученные результаты наглядно иллюстрируют возможности применения методов ОКТ для решения различных задач диагностики состояния предметов искусства.

**Заключение.** Проведенное рассмотрение основных характеристик и результатов применения методов интерферометрии малой когерентности и ОКТ показывает широкие возможности современной оптики, фотоники и компьютерных технологий для решения актуальных проблем исследования свойств различных материалов и объектов в научных исследованиях и современных высоких технологиях.

Методы интерферометрии малой когерентности и ОКТ обеспечивают возможность проведения неразрушающих исследований микроструктуры разнообразных материалов органической и неорганической природы с различным масштабом неоднородностей и разными оптическими свойствами. Отличительная особенность методов ОКТ состоит в наиболее высокой разрешающей способности по сравнению с другими методами томографии, что позволяет разрабатывать новые перспективные методики исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dresel T., Häusler G., Ventzke H.* Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // *Appl. Opt.* 1992. Vol. 31. P. 919—925.
2. *Васильев В. Н., Гуров И. П.* Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности // *Оптические и лазерные технологии.* СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. С. 160—175.
3. *Fercher A. F., Drexler W., Hitzenberger C. K., Lasser T.* Optical coherence tomography — principles and applications // *Rep. Prog. Phys.* 2003. Vol. 66. P. 239—303.
4. *Гуров И. П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6—30.
5. *Tomlins P. H., Wang R. K.* Theory, developments and applications of optical coherence tomography // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38. P. 2519—2535.
6. *Gurov I., Volynsky M.* Evaluation of test polymer samples by full-field low-coherence interferometric profilometer // *Proc. OSAV'2008. 3<sup>rd</sup> Intern. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision.* St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2008. P. 384—388.
7. *Adler D. C., Stenger J., Gorczynska I., Lie H., Hensick T., Spronk R., Wolohojian S., Khandekar N., Jiang J. Y., Barry S., Cable A.E., Huber R., Fujimoto J. G.* Comparison of three-dimensional optical coherence tomography and high resolution photography for art conservation studies // *Optics Express.* 2007. Vol. 15. P. 15 972—15 986.
8. *Васильев В. Н., Гуров И. П.* Сравнительный анализ методов оптической когерентной томографии // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2007. Т. 50, № 7. С. 30—40.
9. *Dubois A., Grieve K., Moneron G., Lecaque R., Vabre L., Voccaro C.* Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43. P. 2874—2883.
10. *Kumar K., Condit J. C., McElroy A., Kemp N. J., Hoshino K., Milner T. E., Zhang X.* Fast 3D in vivo swept-source optical coherence tomography using a two-axis MEMS scanning micromirror // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2008. Vol. 10. P. 1—7.
11. *Wieser W., Biedermann B. R., Klein T., Eigenwillig C. M., Huber R.* Multi-Megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second // *Optics Express.* 2010. Vol. 18. P. 14 685—14 704.
12. *Alarousu E., Gurov I., Kalinina N., Karpets A., Margariants N., Myllylä R., Pyykäri T., Vorobeva E.* Full-field high-resolving optical coherence tomography system for evaluating paper materials // *Proc. SPIE.* 2008. Vol. 7022. P. 7022.
13. *Liang H., Cid M., Cucu R., Dobre G. M., Podoleanu A. Gh., Pedro J. and Saunders D.* En-face optical coherence tomography — a novel application of non-invasive imaging to art conservation // *Optics Express.* 2005. Vol. 13. N 16. P. 6133—6144.
14. *Волынский М. А., Гуров И. П., Жукова Е. В., Левшина А. В., Маргарянц Н. Б., Семов А. А.* Исследование трехмерной микроструктуры материалов на основе методов оптической когерентной томографии // *Фотография. Изображение. Документ.* СПб: Росфото, 2010.

- Сведения об авторах*
- Максим Александрович Волынский** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики
- Елена Александровна Воробьева** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики
- Игорь Петрович Гуров** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; зав. кафедрой; E-mail: gurov@mail.ifmo.ru
- Никита Борисович Маргаряни** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики, научный сотрудник

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

УДК 535.3:539.211

В. А. КОСОБУКИН

## БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО НАНОЗОНДА

Обсуждаются особенности ближнепольной микроскопии посредством линейного нанозонда, сканирующего поверхность образца на субволновом расстоянии от нее. В качестве зонда рассматривается нанопроволока благородного металла, обладающая локальными плазмонами. Применительно к ближнеполевой микроскопии магнитных доменов исследованы зависящие от положения зонда поляризация рассеянного света и магнитооптическая модуляция его интенсивности, резонансно усиленная плазмонами.

**Ключевые слова:** ближнепольная оптика, магнитооптика, микроскопия, рассеяние света, плазмон, электромагнитное усиление.

**Введение.** Задачей ближнепольной микроскопии является получение изображений структуры вещества с разрешением существенно меньшего масштаба, чем длина волны света [1]. Для этого применяют апертуры (щели), волоконно-оптические зонды, малые частицы. Необычайная слабость ближнепольного отклика, особенно магнитооптического, делает необходимым использовать возбуждение локальных плазмонов для усиления слабосигнального отклика [2, 3].

В данной работе обсуждаются принципы сканирующей ближнепольной оптической микроскопии в схеме, использующей линейный нанозонд в качестве источника ближнего светового поля. Схема имеет общий характер, но ниже она обсуждается применительно к ближнепольной магнитооптике. По аналогии с работами [4—7] развивается теория ближнепольных магнитооптических эффектов Керра в рассеянии света линейным зондом. Последний имеет субволновые размеры в двух поперечных измерениях, что необходимо для реализации ближнепольной оптики, а сканирование зондом поверхности образца позволяет сравнивать отклик (оптический контраст) в разных приповерхностных областях. Предлагаемая теория может представить интерес для магнитооптики и микроскопии материалов с плазмонными включениями [8] и для приложений в создании устройств сверхплотной записи [9].

**Принципы ближнепольной оптической микроскопии** приповерхностных магнитных неоднородностей нанометрового размера [7] реализованы в магнитооптическом микроскопе,

используемом ближнем поле малой (диаметром 30 нм) частицы благородного металла (см. экспериментальную [2] и теоретические работы [4—6]). Рассмотрение магнитооптической задачи позволяет продемонстрировать как общие принципы ближнепольной микроскопии, так и эффекты поляризации света и роль плазмонов в усилении оптического отклика.

На рис. 1 иллюстрируются принципы сканирующей ближнепольной магнитооптики с помощью линейного зонда ( $i$ ,  $r$  и  $s$  — падающая, отраженная и рассеянная волны;  $\mathbf{M}$  — латерально неоднородная намагниченность слоя). Источником ближнего поля и излучателем служит линейный зонд (нанопроволока) с характерными поперечными размерами  $a \ll 1/k_0$ , где  $k_0 = \omega/c$ ,  $2\pi/k_0$  — длина волны света в вакууме на частоте  $\omega$ . Предполагается, что зонд расположен вблизи поверхности образца, параллелен ей и границам раздела слоистой среды,  $\epsilon_n$  — диэлектрическая проницаемость  $n$ -го слоя. Диэлектрическая проницаемость материала зонда  $\epsilon(\omega)$  обеспечивает существование долгоживущих (имеющих большую добротность) плазмонов, которые локализованы в плоскости поперечного сечения зонда. Объектом ближнепольной микроскопии служит домен намагниченности  $\mathbf{M}$  нанометрового размера  $\sim w \ll k_0^{-1}$  в латеральном направлении (см. рис. 1).

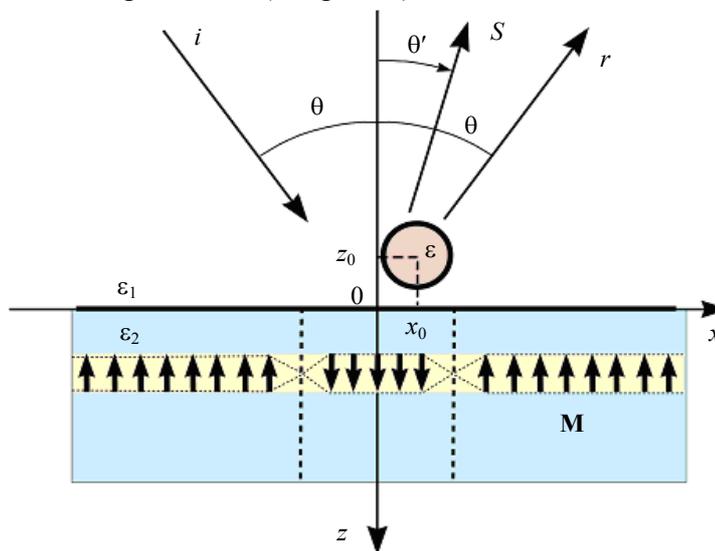


Рис. 1

Система возбуждается линейно поляризованной монохроматической волной

$$\mathbf{E}(\mathbf{p}, \omega) = (\mathbf{e}_x \cos \theta - \mathbf{e}_z \sin \theta) E e^{iq(x \sin \theta + z \cos \theta)}, \quad (1)$$

падающей под углом  $\theta$ , где  $\mathbf{p} = (x, z)$ ,  $q = \sqrt{\epsilon_1} k_0$ . Волна (1) упруго рассеивается зондом и доменом; рассеянные волны детектируются в волновой зоне (на расстоянии  $|\mathbf{p}| \gg 1/k_0$ ). Измеряемый сигнал содержит информацию о поляризации области, находящейся в ближнем поле зонда. Если в зонде (нанопроволоке) возбуждаются локальные плазмоны, то интенсивность ближнего поля и рассеянного света резонансно усиливается. При сдвиге зонда относительно домена на нанометровые расстояния оптический отклик как функция координаты сканирования  $x_0$  (рис. 1) варьируется. Сканирующая ближнепольная магнитооптическая микроскопия обеспечивает возможность наблюдения поляризационно-чувствительного оптического контраста по поверхности образца.

Неоднородное распределение намагниченности образца  $\mathbf{M}(\mathbf{p})$  параллельно и перпендикулярно поверхности образца описывается функциями  $f_{\parallel}(x)$  и  $f_{\perp}(z)$  соответственно. Намагниченность  $\mathbf{M}(\mathbf{p})$  определяет вклад в диэлектрическую поляризацию при  $\mathbf{M} \parallel \mathbf{e}_z$  (см. рис. 1):

$$\Delta P_{\alpha}(\mathbf{p}) = \frac{i\varepsilon_B}{4\pi} f_{\parallel}(x) f_{\perp}(z) \sum_{\beta} (\delta_{\alpha x} \delta_{\beta y} - \delta_{\alpha y} \delta_{\beta x}) E_{\beta}(\mathbf{p}), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_B \sim M$ ,  $\delta_{\alpha\beta} = 1$  при  $\alpha = \beta$  и  $\delta_{\alpha\beta} = 0$  при  $\alpha \neq \beta$ . Для света, зеркально отраженного от поверхности образца, ориентация однородной намагниченности  $\mathbf{M} \parallel \mathbf{e}_z$  такая же, как при полярном магнитооптическом эффекте Керра. Далее эффект этого типа рассматривается в геометрии рассеяния  $i \rightarrow s$  (рис. 1).

**Теория.** Задача электродинамики для линейного зонда решается в рамках теории многократного рассеяния [4—7]. Вклады в диэлектрическую поляризацию, создаваемые зондом и магнитным доменом, считаются возмущением. Поляризация зонда рассматривается самосогласованно с учетом резонансного „эффекта сил изображения“, а магнитоиндуцированная поляризация (2) учитывается в первом приближении.

Для простоты далее считаем, что диэлектрическая проницаемость среды равна  $\varepsilon_1$  при  $z < 0$  и  $\varepsilon_2$  при  $z > 0$  (см. рис. 1). В качестве модели зонда рассмотрим круговой цилиндр (нанопроволоку), обладающий в оптическом диапазоне локальными плазмонами, поляризованными перпендикулярно оси. При рассеянии волны (1) компонента ее волнового вектора вдоль оси  $y$  бесконечного цилиндра сохраняется, а поле рассеянных волн зависит от  $\mathbf{p} = (x, z)$ . Положение оси цилиндра в плоскости  $xz$  задается вектором  $\mathbf{p}_0 = x_0 \mathbf{e}_x + z_0 \mathbf{e}_z$ , где  $|z_0| \ll 1/k_0$  — необходимое условие ближнепольной оптики.

В случае кругового цилиндра радиуса  $a$  ( $\ll 1/k_0$ ), расположенного на расстоянии  $|z_0|$  от поверхности образца  $z = 0$  (см. рис. 1), поперечные компоненты поляризуемости комплекса „цилиндр+изображение“ на единицу его длины равны

$$\chi^{(\alpha)} = \frac{a^2 (\varepsilon - \varepsilon_1)}{2} \left( \varepsilon + \varepsilon_1 - \frac{a^2 (\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{4|z_0|^2 \varepsilon_1 (\varepsilon_2 + \varepsilon_1)} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha = x, z$ . При  $|z_0| \gg a$  выражение (3) описывает поляризуемость изолированного цилиндра в однородной среде, а условие  $\text{Re} \varepsilon(\omega) + \varepsilon_1 = 0$  определяет частоту его дипольных плазмонов. Второй член в знаменателе формулы (3) учитывает влияние на частоту плазмона взаимодействия между цилиндром и поверхностью образца (эффект сил изображения).

Обсудим структуру поля, рассеянного комплексом „зонд+изображение“, в случае волны (1), падающей по нормали ( $\theta = 0$ ). При  $\rho \gg 1/k_0$ , где  $\mathbf{p} = (x, z)$  — радиус-вектор точки наблюдения с  $z < 0$  (рис. 1), поле излучения может быть представлено цилиндрическими волнами с компонентами ( $\alpha = x, y$ )

$$\frac{1}{E} E'_{\alpha}(\mathbf{p}, \omega) = \sqrt{2\pi} \frac{e^{iq\rho + i\pi/4}}{\sqrt{q\rho}} \cos \theta' F_{\alpha}(Q'). \quad (4)$$

Здесь  $q = \sqrt{\varepsilon_1} k_0$ ,  $\sin \theta' = x/\rho$ ,  $\cos \theta' = |z|/\rho$ , угол  $\theta' (\neq 0)$  отсчитывается от отрицательного направления оси  $z$ ,  $Q' = q \sin \theta'$  — компонента волнового вектора

$$\mathbf{K}' = q (\mathbf{e}_x \sin \theta' - \mathbf{e}_z \cos \theta') \quad (5)$$

рассеянной волны (4) с  $|Q'| \lesssim q$ . Выражение (4) описывает линейно поляризованную волну  $\mathbf{E}'_{\lambda} = E'_{\lambda} \mathbf{e}'_{\lambda}$  с волновым вектором (5) и вектором поляризации  $\mathbf{e}'_{\lambda}$ , равным  $\mathbf{e}'_p = -(\mathbf{e}_x \cos \theta' + \mathbf{e}_z \sin \theta')$  или  $\mathbf{e}'_s = \mathbf{e}_y$  в случае поляризации  $p$  или  $s$  соответственно. В отсут-

ствии намагниченности ( $\mathbf{M} = 0$ ) для упругого (рэлеевского) рассеяния  $p \rightarrow p$  на цилиндре в формуле (4) стоит

$$F_x(Q') = k_0^2 \chi^{(x)} e^{-iQ'x_0} h_p(Q', z_0) h_p(0, z_0) \cos \theta', \quad (6)$$

$$h_p(\kappa, z) = e^{ik_1(\kappa)z} + r_p(\kappa) e^{-ik_1(\kappa)z}, \quad r_p = (\varepsilon_1 k_2 - \varepsilon_2 k_1) / (\varepsilon_1 k_2 + \varepsilon_2 k_1), \quad k_n = \sqrt{\varepsilon_n k_0^2 - \kappa^2}.$$

Для магнитооптической компоненты рассеяния  $p \rightarrow s$  учет (2) дает

$$F_y(Q') = \frac{\varepsilon_B}{2\varepsilon_1 \cos \theta'} k_0^2 \chi^{(x)} t_s(Q') J(Q', \mathbf{p}_0) h_p(0, z_0), \quad (7)$$

$$J(Q', \mathbf{p}_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} e^{-i\kappa x_0 - ik_1(\kappa)z_0} I_{\parallel}(Q' - \kappa) I_{\perp}(Q', \kappa) t_p(\kappa) k_1(\kappa), \quad (8)$$

где  $t_s = 2k_1 / (k_1 + k_2)$ ,  $t_p = 1 + r_p = 2\varepsilon_1 k_2 / (\varepsilon_1 k_2 + \varepsilon_2 k_1)$ ,

$$I_{\perp}(Q', \kappa) = \int_0^{\infty} dz f_{\perp}(z) e^{i[k_2(Q') + k_2(\kappa)]z}, \quad (9)$$

$$I_{\parallel}(Q' - \kappa) = \int_{-\infty}^{\infty} dx f_{\parallel}(x) e^{-i(Q' - \kappa)x}. \quad (10)$$

Для ультратонкого магнитного слоя толщиной  $l \ll k_0^{-1}$  со средней плоскостью  $z = z_1$  ( $> l/2$ ) в согласии с магнитооптикой атомарно тонких слоев [10] интеграл (9) принимает вид:  $I_{\perp}(Q', \kappa) = l \exp\{i[k_2(Q') + k_2(\kappa)]z_1\}$ .

В общем случае распределение  $f_{\parallel} = \bar{f}_{\parallel} + \delta f_{\parallel}$  в (2) включает вклады  $\bar{f}_{\parallel}$  однородной и  $\delta f_{\parallel}$  неоднородной намагниченности, чему в выражениях (8) и (10) соответствует  $J = \bar{J} + \delta J$  и  $I_{\parallel} = \bar{I}_{\parallel} + \delta I_{\parallel}$ . В геометрии рис. 1 для латерально однородной намагниченности принимаем  $\bar{f}_{\parallel} = -1$  и из формул (8) и (10) получаем

$$\bar{J}(Q', \mathbf{p}_0) = -ql t_p(Q') \cos \theta' e^{-iQ'x_0 - ik_1(Q')z_0 + 2ik_2(Q')z_1}. \quad (11)$$

Подстановка соотношения (11) в (7) дает величину  $\bar{F}_y$ , определяющую поле (4) для магнитооптического эффекта Керра в рассеянии света зондом при однородной намагниченности слоя  $-M\mathbf{e}_z$ . Для домена намагниченности в формулах (2) и (10) принимаем

$$\delta f_{\parallel}(x) = \frac{2w^2}{x^2 + w^2}, \quad \delta I_{\parallel}(\kappa) = 2\pi w e^{-|\kappa|w}. \quad (12)$$

Тогда с точностью до членов  $\sim k_0(w + |z_0| + z_1) \ll 1$  из формулы (8) находим

$$\delta J(Q', \mathbf{p}_0) = \frac{4i\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} l w \frac{(w + |z_0| + z_1)^2 - x_0^2}{\left[ x_0^2 + (w + |z_0| + z_1)^2 \right]^2}. \quad (13)$$

Подстановка соотношения (13) в (7) дает величину  $\delta F_y$ , входящую в поле вида (4), которое связано с намагниченностью домена.

Безразмерное сечение рассеяния света  $W = (2aL)^{-1} d\sigma/d\theta'$  на цилиндре длиной  $L \gg k_0^{-1}$  представляется в виде  $W = \rho S' / (2aS^{\text{inc}})$ , где  $S^{\text{inc}}$  и  $S'$  — величины вектора

Пойнтинга падающей (1) и рассеянной (4) волн. Для рассеянного света с поляризацией в плоскости анализатора  $45^\circ$ , образующей угол  $45^\circ$  с плоскостью  $xz$ ,  $W$  выражается суммой вкладов [7]

$$W_R + \bar{W}_M + \delta W_M = \frac{\pi}{qa} \left\{ \frac{1}{2} |F_x|^2 - \left[ \operatorname{Re}(F_x^* \bar{F}_y) + \operatorname{Re}(F_x^* \delta F_y) \right] \cos \theta' \right\}, \quad (14)$$

где учтено соотношение  $|F_y| \ll |F_x|$  между (6) и (7). Вклад  $W_R$  в (14) обусловлен упругим (рэлеевским) рассеянием света  $p \rightarrow p$  комплексом „зонд+изображение“ при  $\mathbf{M} = 0$ , а вклады  $\bar{W}_M$  и  $\delta W_M$  — рассеянием  $p \rightarrow s$ , связанным с латерально однородным  $\bar{f}_{\parallel}$  и неоднородным  $\delta f_{\parallel}$  распределениями намагниченности.

**Численный анализ.** Результаты численного расчета наблюдаемых величин для серебряной нанопроволоки, зондирующей ультратонкий слой кобальта, находящийся в матрице из золота ( $z > 0$ , рис. 1) вблизи ее поверхности, представлены на рис. 2 и 3. Диэлектрические функции  $\epsilon$  для Ag и  $\epsilon_2$  для Au взяты из работы [11], а  $\epsilon_B$  для Co — из [12].

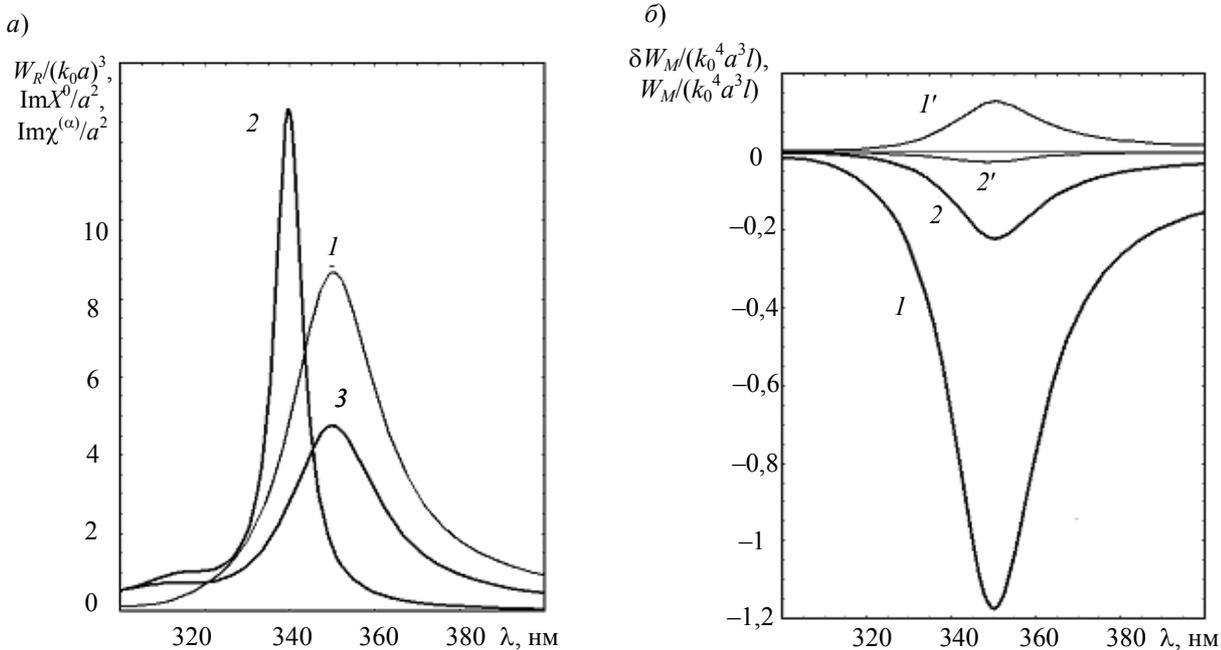


Рис. 2

На рис. 2, а приведен спектр упругого рассеяния света  $W_R$  комплексом „цилиндр+изображение“ (кривая 1), вычисленный по формуле (14). Он сравнивается со спектрами мнимой части поляризуемости (оптического поглощения) Ag цилиндра, расположенного в однородной среде (кривая 2) и около границы Au (кривая 3). Все кривые показывают наличие локального плазмонного резонанса, который смещен в длинноволновую сторону и уширен в случае цилиндра, расположенного вблизи массивного Au. На рис. 2, б приведены рассчитанные по формулам (6)—(14) магнитооптические вклады  $\delta W_M / (k_0^4 a^3 l)$  (кривые 1 и 2) и  $\bar{W}_M / (k_0^4 a^3 l)$  ( $1'$  и  $2'$ ) в сечение рассеяния (14) при  $\theta' = 30^\circ$  (1 и  $1'$ )  $\theta' = 60^\circ$  (2 и  $2'$ ). Параметры вычислены при нормальном падении света ( $\theta = 0$ ) для цилиндра Ag радиуса  $a = 4,5$  нм, находящегося в среде с  $\epsilon_1 = 2$  на расстоянии  $|z_0| = 5$  нм от поверхности Au со слоем Co внутри, для которого  $z_1 = 2$  нм и  $l < 2z_1$ . Резонансные особенности функций отклика

$\bar{W}_M$  и  $\delta W_M$  в области плазмонного резонанса коррелируют со спектрами поляризуемости цилиндра (рис. 2, а). Таким образом, при возбуждении через локальные плазмоны нанопроволоки магнитооптический отклик  $\bar{W}_M + \delta W_M$  существенно усиливается по сравнению с его значением вдали от плазмонного резонанса. Здесь имеет место усиление или ослабление интенсивности рассеяния, аналогичное истинному усилению магнитооптического эффекта Керра поверхностными плазмонами [10]. В спектрах углов керровского вращения и эллиптичности усиление отсутствует: определяющее эти углы отношение  $F_y/F_x$  величин (6) и (7) не содержит резонансной функции (3).

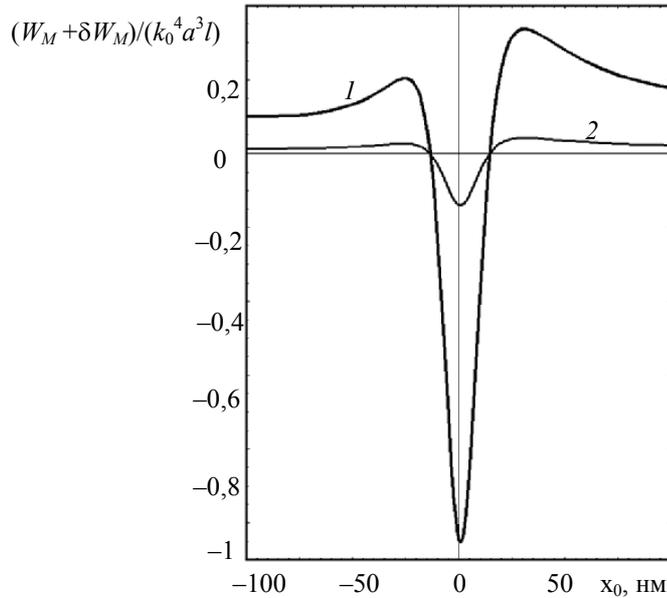


Рис. 3

На рис. 3 иллюстрируется представленная теория применительно к сканирующей ближнеполюсной микроскопии. Магнитооптический отклик  $\bar{W}_M + \delta W_M$  из (14) показан на рис. 3 как функция координаты нанозонда  $x_0$  (длина волны 350 (1) и 400 нм (2)); вычислено для рассеянного света при  $\theta = 0$ ,  $\theta' = 30^\circ$ ,  $w = 10$  нм и тех же параметрах, что на рис. 2). Зависящий от  $x_0$  вклад  $\delta W_M$  определяет сигнал сканирующей ближнеполюсной микроскопии, который дает „изображение“ домена намагниченности с центром  $x = 0$  и формой, заданной выражением (12). Сигнал  $\delta W_M$  проявляется на „фоне“ вклада  $\bar{W}_M$  однородной составляющей намагниченности, который не зависит от  $x_0$ . Рис. 3 показывает, что величина вкладов  $\delta W_M$  и  $\bar{W}_M$  в интенсивность рассеяния на частоте плазмонного резонанса (длина волны около 350 нм) значительно больше, чем вне резонанса (400 нм). Еще большего резонансного усиления ближнеполевого сигнала плазмонами можно ожидать в случае эллиптического цилиндра.

**Выводы.** Предложена схема ближнеполюсного оптического микроскопа, использующего линейный нанозонд (нанопроволоку благородного металла), продемонстрированы особенности сканирующей микроскопии в режиме рассеяния и сделаны практически важные оценки. Для линейного зонда получены существенно иные характеристики рассеяния света, чем для точечных зондов. Показано, что при возбуждении плазмонов в зонде происходит значительное резонансное усиление вклада в интенсивность ближнеполюсных магнитооптических эффектов; при этом усиления керровского вращения и эллиптичности не происходит. Показано, что размер „изображения“ нанобъекта в ближнеполюсной микроскопии превышает его

истинный размер на величину расстояния между объектом и зондом по нормали к поверхности образца. Основные выводы, сделанные в данной работе для весьма сложного случая резонансной магнитооптической микроскопии в поляризованном свете, справедливы и для обычной ближнеполевой оптики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novotny L., Stranick S. J.* Near-Field Optical Microscopy and Spectroscopy with Point Probes // *Ann. Rev. Phys. Chem.* 2006. Vol. 57. P. 303—331.
2. *Silva T. J., Schultz S., Weller D.* Scanning near-field optical microscope for the imaging of magnetic domains in optically opaque materials // *Appl. Phys. Lett.* 1994. Vol. 65. P. 658—660.
3. *Safarov V. I., Kosobukin V. A., Hermann C., Lampel G., Marliere C., Peretti J.* Near-field magneto-optics with polarization sensitive STOM // *Ultramicroscopy.* 1995. Vol. 57. P. 270—276.
4. *Kosobukin V. A.* Magneto-optics via the near field // *Surface Science.* 1998. Vol. 406. P. 32—47.
5. *Кособукин В. А.* К теории сканирующей ближнеполевой магнитооптической микроскопии // *ЖТФ.* 1998. Т. 43. С. 824—829.
6. *Kosobukin V. A.* Theoretical aspects of near-field magneto-optics and scanning magneto-optical microscopy // *Proc. SPIE.* 1999. Vol. 3791. P. 93—101.
7. *Кособукин В. А.* Ближнеполевая магнитооптика в резонансном рассеянии света линейным нанозондом // *Письма в ЖТФ.* 2008. Т. 34, № 19. С. 86—94.
8. *Abe M., Suwa T.* Surface plasma resonance and magneto-optical enhancement in composites containing multicore-shell structured nanoparticles // *Phys. Rev.* 2004. Vol. B 70. P. 235 103.
9. *Betzig E., Trautman J. K., Wolfe R. et al.* Near-field magneto-optics and high density data storage // *Appl. Phys. Lett.* 1992. Vol. 61. P. 142—144.
10. *Hermann C., Kosobukin V.A., Lampel G. et al.* Surface-enhanced magneto-optics in metallic multilayer films // *Phys. Rev.* 2001. Vol. B 64. P. 235 422.
11. *Johnson P. B., Christy R. W.* Optical constants of the noble metals // *Phys. Rev.* 1972. Vol. B 6. P. 4370—4379.
12. *Кринчик Г. С., Артемьев В. А.* Магнитооптические свойства никеля, кобальта и железа в УФ, видимой и ИК областях спектра // *ЖЭТФ.* 1967. Т. 53. С. 1901.

#### *Сведения об авторе*

**Владимир Артемович Кособукин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра твердотельной электроники; E-mail: Vladimir.Kosobukin@mail.ioffe.ru

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.

## SUMMARY

P. 7—12.

### HIGH POWER LASER PROPULSION

Development of new transportation systems for satellite launching and space vehicle missions based on the use of high-power lasers is analyzed. Achievement of high energy efficiency of thrust production as well as minimization of propellant consumption are considered as principal concerns of high-power laser propulsion development. The consideration is based on experimental study of interaction of pulsed laser radiation with various propellants.

**Keywords:** laser propulsion, laser breakdown, laser ablation, specific impulse, momentum coupling coefficient.

#### *Data on author*

*Yuri A. Rezunkov* — Dr. of Techn. Sci.; Research Institute for Complex Testing of Optic-Electronic Devices, Sosnovy Bor, Leningrad region; Head of Laboratory; E-mail: yuri@sbor.net

P. 13—17.

### PRACTICE OF COMMERCIAL APPLICATION OF LASER TECHNOLOGICAL COMPLEXES ON THE BASE OF FIBER GENERATORS

An experience in industrial application of fiber laser technological complexes for material processing is described. Characteristics of several technological procedures are presented, cost saving potentialities of the complexes are demonstrated.

**Keywords:** fiber laser, laser cutting, laser heat treatment, laser-assisted material processing, laser technological complex.

#### *Data on author*

*Eugeny P. Markin* — SP Lasertech Public Corporation, St. Petersburg; Chief Engineer  
*Alexander K. Lozovoy* — SP Lasertech Public Corporation, St. Petersburg; Chief Technologist;  
E-mail: lozovoy.58@mail.ru  
*Sergey N. Smirnov* — SP Lasertech Public Corporation, St. Petersburg; General Director;  
E-mail: lasertex@mail.ru  
*Yuri G. Yakhontov* — SP Lasertech Public Corporation, St. Petersburg; Head of Scientific and Technical Department; E-mail: yuri84@yandex.ru

## P. 17—21.

**AN EXPERT SYSTEM FOR LASER MICROPROCESSING MODE OPTIMIZATION**

An expert system for decision making in laser microprocessing mode optimization is proposed. Current processing results are evaluated with the use of optoelectronic sensors data.

**Keywords:** laser micromachining, decision support system, expert system, complementary scanners, galvanometer optic scanners, machine vision system.

*Data on authors*

- Evgeny D. Bulushev* — Institute of Automatics and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Department of Automation of Physical-Technical Researches, Novosibirsk; Engineer-Programmer; E-mail: e.d.bulushev@gmail.com
- Viktor P. Bessmeltsev* — Cand Techn. Sci.; Institute of Automatics and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Department of Automation of Physical-Technical Researches, Head of Laboratory, Novosibirsk; E-mail: bessmelt@iae.nsk.su
- Nikolay V. Goloshevsky* — Institute of Automatics and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Department of Automation of Physical-Technical Researches, Novosibirsk; Junior Scientist; E-mail: nickolayg@iae.nsk.su

## P. 22—25.

**PULSED LASER ASSISTED FORMING OF THIN SHEET METAL**

Process of laser bending of alloyed steel sheets of 0,3 to 1,1 mm thickness is analyzed. Pulse Nd:YAG laser (average power of 200 W, pulse duration of 0,1—10 ms) is employed and programmable 6-axis robot Motoman SSF-2000 is used for formation of illuminated area of irregular-shaped details. Experimental results show that bend angle may be varied through a wide range depending on the laser-processing mode.

**Keywords:** laser forming, solid-state laser.

*Data on authors*

- Andrey D. Kochetov* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: user32-dll@mail.ru
- Andrey A. Petrov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: petrovandrey79@inbox.ru

## P. 26—32.

**LASER-INDUCED SILICON SURFACE STRUCTURING FOR SOLAR CELL APPLICATION**

Creation of laser-induced morphology features of the c-Si and mc-Si with the use of 532 nm Nd: YAG laser nanosecond pulses in vacuum and CO<sub>2</sub> atmosphere is investigated. Specimens of 20×20 mm laser-textured mc-Si wafers with typical pillar array structures of aspect ratio (depth to width) greater than or equal to 3 and weighted effective reflectance below 3 % are obtained.

**Keywords:** multicrystalline silicon, laser texturing, solar cells.

*Data on authors*

- Eugeny V. Khaydukov* — Post-Graduate Student; Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; E-mail: khaydukov@mail.ru
- Olga D. Khramova* — Cand. Chem. Sci.; Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; Senior Scientist; E-mail: onov@mail.ru
- Vasilina V. Rocheva* — Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; Junior Scientist; E-mail: vrocheva@mail.ru

- Dmitry A. Zuev** — Post-Graduate Student; Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; E-mail: dmitryzuev@yandex.ru
- Oleg A. Novodvorsky** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; Senior Scientist, Head of Laboratory; E-mail: onov@mail.ru
- Andrey A. Lotin** — Post-Graduate Student; Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; E-mail: lotin\_82@mail.ru
- Liubov S. Parshina** — Institute on Laser and Information Technologies RAS; Shatura, Moscow Region; Junior Scientist; E-mail: goga\_107@list.ru
- Alexander Yu. Poroykov** — Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University, Leading Electronic Engineer; E-mail: aporoykov@mics.msu.su
- Mikhail A. Timofeev** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University; Leading Scientist; E-mail: tma@dnph.phys.msu.su
- Gennady G. Untila** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University; Senior Scientist; E-mail: guntila@mics.msu.su

**P. 32—37.**

**MODIFICATION OF PHOTSENSITIVE GLASS-CERAMIC “FOTURAN” WITH ULTRASHORT LASER PULSES**

Laser-induced modification of photosensitive glass-ceramic material under YAG:Nd second harmonic picosecond pulses is observed. A method for such modification based on laser processing and subsequent heat treatment is developed. Comparison with infrared femtosecond modification is performed.

**Keywords:** laser-induced modification, picosecond pulses, photosensitive glass-ceramic, Foturan.

*Data on authors*

- Eduard I. Ageev** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Junior Scientist; E-mail: ageeved@gmail.com
- Vadim P. Veiko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Head of Department; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Khanh Q. Kieu** — PhD; The University of Arizona: College of Optical Sciences, USA

**P. 37—41.**

**REDISTRIBUTION OF ELEMENTS IN STEEL LASER WELD JOINT STUDIED WITH LASER-INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY**

Redistribution of elements in joints of steel plates after laser welding is studied. Laser emission spectral analysis (LIBS) reveals the following trends of horizontal and vertical migration of alloying elements: Mn towards the front side of the weld joint, Al towards the back side with concentration at the central line. Dependences of the redistribution on welding type and parameters are studied.

**Keywords:** laser, welding, weld joint, composition, spectral analysis, LIBS.

*Data on authors*

- Elena L. Surmenko** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Saratov State Technical University, Department of Electronic Machine Building and Welding; E-mail: surmenko@yandex.ru
- Ivan A. Popov** — Post-Graduate Student; Saratov State Technical University, Department of Theoretical Mechanics; E-mail: antaresrock@yandex.ru
- Tatiana N. Sokolova** — Cand. Techn. Sci.; Saratov State Technical University, Department of Electronic Machine Building and Welding; E-mail: sokolova@pribor-t.ru

## P. 42—46.

**FORMATION OF PERIODIC STRUCTURES AT THE SURFACE OF SILICATE UNDER RESONANT ACTION OF CO<sub>2</sub> LASER IRRADIATION**

Periodical structures formed at the surface of a natural silicate (quartz, fused silica, nepheline, and rodonite) under the action of pulsed CO<sub>2</sub> laser radiation (pulse energy of 1 J, pulse duration of 70 ns) is studied. High resolution optical microscope is used for observation of laser spot characteristics and IR reflection spectroscopy is applied to investigate the surface features before and after exposure to CO<sub>2</sub> laser irradiation. The period of the structures obtained is found to be of about 7,3 μm for crystal quartz and about 8 μm for fused silica at laser frequency of 975 cm<sup>-1</sup>.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser, fused silica, quartz, silicate, periodical structures, IR reflection spectra.

*Data on authors*

- Anel F. Mukhamedgalieva* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Moscow State Mining University, Department of Physics; E-mail: anel-mggu@mail.ru
- Anatoly M. Bondar* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Moscow State Mining University; E-mail: bam-imet@mail.ru
- Vladimir B. Laptev* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute of Spectroscopy RAS; Senior Scientist; E-mail: laptev@isan.troitsk.ru
- Mikhail G. Zilbershmidt* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Moscow State Mining University, Department of Physics of Rocks
- Irina V. Velevich* — Moscow State Mining University; Senior Scientist
- Igor M. Shvedov* — Cand. Techn. Sci.; Moscow State Mining University, Department of Physics of Rocks; E-mail: svirell@mail.ru

## P. 47—52.

**COLOR IMAGE FORMATION AT LASER OXIDATION OF METALS**

Experimental results and theoretical analysis of color image formation at laser oxidation of stainless steel surface are presented. A method is proposed for choice of laser radiation parameters to ensure a desirable color of the film.

**Keywords:** laser-matter interaction, laser, ablation, oxidation, thin films.

*Data on authors*

- Vadim P. Veiko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Head of Department; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Sergey G. Gornyy* — Cand. Techn. Sci.; “Laser Center” Public Corporation, St. Petersburg; Director; E-mail: sgornyy@newlaser.ru
- Galina V. Odintsova* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; Engineer; E-mail: ogv-r@yandex.ru
- Mikhail I. Patrov* — “Laser Center” Public Corporation, St. Petersburg; Engineer; E-mail: Michael.Patrov@mail.ioffe.ru
- Konstantin V. Yudin* — “Laser Center” Public Corporation, St. Petersburg; Chief Technologist; E-mail: nepalec@yandex.ru

**P. 53—56.**

### **LASER-ASSISTED GRAFFITI PAINTS REMOVAL**

It's hard to imagine a view of a modern city without some drawings and inscriptions, usually called "graffiti". Traditional cleaning methods do not meet modern requirements. Investigation of possibilities of laser-assisted paints removal is performed. The optimal conditions for various paints removing from different surfaces are established.

**Keywords:** laser cleaning, paint removal, graffiti, CO<sub>2</sub> laser, fiber Yb laser.

#### *Data on authors*

- Boris Yu. Novikov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology;  
E-mail: novikov-bu@yandex.ru
- Yuri V. Chikhalev** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology;  
E-mail: guitarrista@mail.ru
- Elena A. Shakhno** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology;  
E-mail: shakhno@lastech.ifmo.ru

**P. 56—61.**

### **LASER CLEANING OF SCREENED PRINTING ROLLS**

Technology of dry laser cleaning of screened printing rolls of various types of paint is developed. Safety of the method of pollution removal is confirmed experimentally for various microreliefs of printing roll ceramic coat.

**Keywords:** flexography, screened roll, laser cleaning, fiber laser, thermo-mechanical effect.

#### *Data on authors*

- Andrey A. Samokhvalov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology;  
E-mail: andrugko@list.ru
- Mikhail V. Yarchuk** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Junior Scientist;  
E-mail: chukforyou@list.ru

**P. 61—64.**

### **LASER-ASSISTED RAIL CLEANING TO ENHANCE THE FRICTION COEFFICIENT**

Application of fiber laser for cleaning of various types of pollution from railway is studied both theoretically and experimentally with q-switched pulsed Ytterbium fiber laser (average power 50 W, pulse width 100 ns). The friction coefficient is shown to increase for 30 % as a result of laser-assisted rail cleaning.

**Keywords:** laser cleaning, fiber laser, rail cleaning.

#### *Data on authors*

- Vadim P. Veiko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Head of Department; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Andrey A. Petrov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology;  
E-mail: petrovandrey79@inbox.ru
- Alexander S. Maznev** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Transport University, Department of Electric Traction; E-mail: el\_tyaga@mail.ru

- Andrey M. Evstafiev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State Transport University, Department of Electric Traction; E-mail: evstam@mail.ru
- Anna A. Kalinina* — St. Petersburg State Transport University, Department of Electric Traction; Assistant Lecturer; E-mail: anya-c@mail.ru

**P. 65—68.****ON FEASIBILITY OF SPECTROSCOPIC CONTROL OVER LASER CLEANING PROCESS**

Spectroscopic analysis of laser plume is used for checking quality of laser cleaning of surfaces. Results of experimental study of the approach are presented. A model method is proposed for estimation of deactivation coefficient from data obtained in experiments carried out with nonradioactive isotopes of most persistent radioactive pollutants.

**Keywords:** laser cleaning, laser deactivation.

**Data on authors**

- Vadim P. Veiko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Head of Department; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Sergey A. Volkov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technique and Biomedical Optics; Senior Scientist
- Timofey Yu. Mutin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Junior Scientist; E-mail: timofeymutin@yandex.ru
- Valentine N. Smirnov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology

**P. 69—74.****APPLICATION OF LASER TECHNOLOGIES FOR ARTWORKS RESTORATION**

Feasibilities of laser technologies in restoration of pieces of art made of precious metals are demonstrated by the example of restoration of the M. I. Likhacheva treasure.

**Keywords:** scientific restoration, laser cleaning, laser welding, laser finishing.

**Data on author**

- Igor K. Malkiel* — The State Hermitage Museum, Department of the East, Laboratory for Scientific Restoration of Precious Metals, St. Petersburg; Head of Laboratory

**P. 75—82.****REMOTE TESTING OF MICROLENS WITH THE USE OF LOW-COHERENCE INTERFEROMETRY AND OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY**

Main features of low-coherence interferometric methods and optical coherence tomography as applied to high-resolution investigation of surface micro relief and microstructure of samples of various materials are considered. Results are presented of practical employment of the two methods for study of a polymer material surface, microstructure of a paper sample, and for analysis of lacquer layer microstructure carried out for assessment of condition of a painting for further restoration with the use of laser technologies.

**Keywords:** remote testing, microobject, low-coherence interferometry method, optical coherence tomography.

**Data on authors**

- Maxim A. Volynsky* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology;

- 
- Elena A. Vorobieva* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology
- Igor P. Gurov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology; Head of Department; E-mail: [gurov@mail.ifmo.ru](mailto:gurov@mail.ifmo.ru)
- Nikita B. Margariantz* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology; Scientist

**P. 82—88.**

### **NEAR-FIELD MICROSCOPY WITH A LINEAR NANOPROBE SUPPORTING PLASMONS**

Basic ideas of near-field microscopy with a linear nanoprobe scanning a sample surface at a subwavelength distance are discussed. The probe in question is a noble-metal nanowire supporting surface plasmons. In conformity with the near-field microscopy of a magnetic domain, the polarization effects and plasmon-enhanced intensity of magneto-optical scattering are studied depending on the probe location.

**Keywords:** near-field optics, magneto-optics, microscopy, scattering of light, plasmon, electromagnetic enhancement.

#### *Data on author*

- Vladimir A. Kosobukin* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Ioffe Physical-Technical Institute RAS; Saint-Petersburg State Polytechnical University, Department of Solid-State Electronics; E-mail: [Vladimir.Kosobukin@mail.ioffe.ru](mailto:Vladimir.Kosobukin@mail.ioffe.ru)

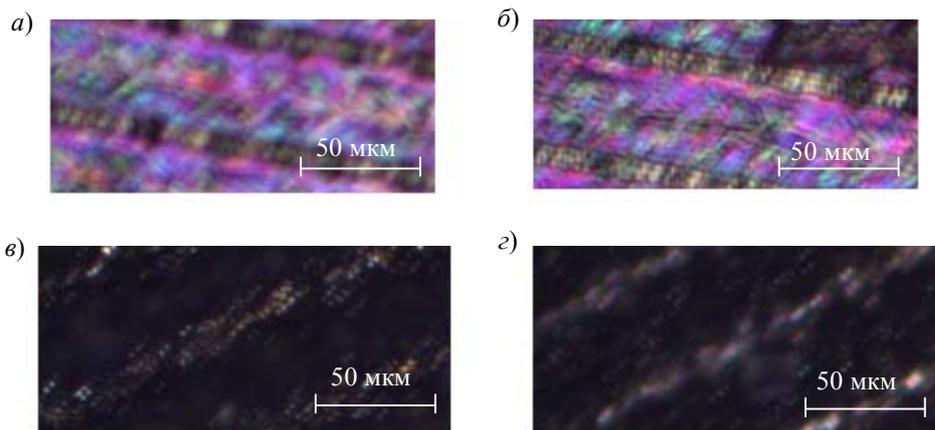


Рис. 3 к статье Вейко В. П. и др. (стр. 47—52)

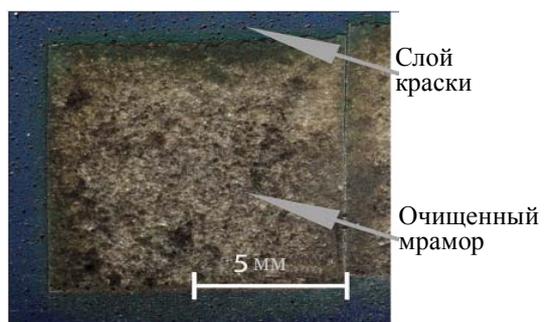


Рис. 1



Рис. 2

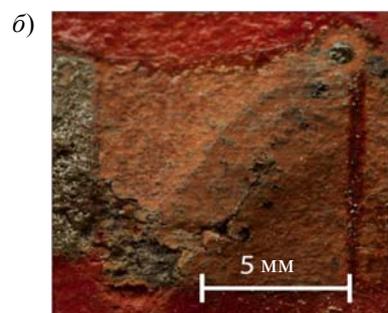
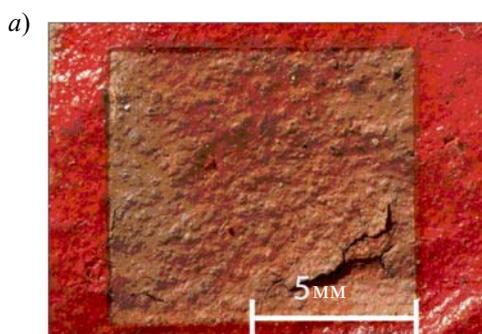


Рис. 3

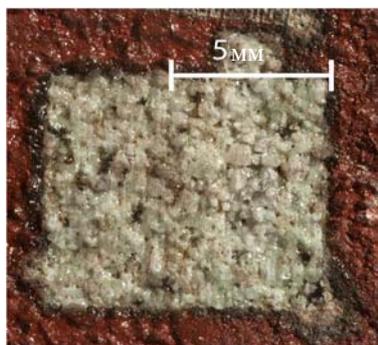


Рис. 4

Рисунки к статье Новикова Б. Ю. и др. (стр. 53—56)