



ПРЕЦИЗИОННАЯ ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ ГРАВИРОВКА С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

Т. Кунце¹, Т. Роч^{1,2}, Т. Гофман², Е. Федына³, В. Коно-
валов³, Д. Ульянов^{3,*}, А. Лазани^{1,2}

Прецизионная прямая лазерная интерференционная гравировка позволяет создавать периодические структуры на поверхности разнообразных материалов в течение однократного процесса обработки материала. Метод может быть использован для получения поверхностей с заданными свойствами и при создании систем защиты от контрафактной продукции.

Известно, что некоторые поверхности с упорядоченной топографией демонстрируют улучшенные характеристики по сравнению с характеристиками поверхностей с хаотичной структурой. Примеры упорядоченной топографии, такие как периодические поверхностные структуры, встречающиеся в природе у различных растений и животных, появились в результате многотысячелетнего процесса эволюции [1]. Таким образом, природа показала себя в качестве лучшего технолога по приспособлению видов к условиям окружающей среды с целью выживания.

¹ Фраунгоферовский институт материалов и лучевых технологий IWS, Винтербергштрассе 28, 01277 Дрезден, Германия.

² Институт технологий машиностроения, Дрезденский Технический университет, Георг-Баер-штрассе.1, 01069 Дрезден, Германия

³ ЛАЗЕР-КОМПАКТ, ООО "Лазер-экспорт", ул. Введенского 3, Москва, 117342, Россия

* ulyanov@laser-export.com

HIGH RESOLUTION DIRECT LASER INTERFERENCE PATTERNING BY HIGH ENERGY Q-SWITCHED LASERS

T. Kunze¹, T. Roch^{1,2}, T. Hoffmann², E. Fedyna³,
V. Kononov³, D. Oulianov^{3,*}, A. Lasagni^{1,2}

High resolution direct laser interference patterning allows creation of submicron periodic features on various material surfaces in a single process. This method can be employed for the functionalization of surfaces as well as for product counterfeit protection.

Surfaces with controlled topographic characteristics have shown in the past to provide enhanced surface properties in comparison to surfaces with a "random" roughness. Several examples of surfaces with an ordered topography (e.g. periodic surface structure) can be found on the surfaces of different plants and animals, resulting from several thousand years of evolution [1]. In this way, nature has shown to be the best technologist to overcome any survival challenge.

The field of bio-inspiration is emerging as one of the most innovative areas of science today. In this frame, laser based technologies can provide the required technological and economical aspects to reproduce such surfaces [2, 3].

An innovative solution for high resolution surface patterning of periodic structures in a one step process is Direct Laser Interference Patterning (DLIP) [4, 5]. This process is based on creation of interference patterns by overlapping two or more coherent high power pulsed laser beams on a surface of a material. If laser intensity of interference pattern nodes exceeds ablation threshold the surface of the material gets modified.

¹ Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, Winterbergstrasse 28, 01277 Dresden, Germany.

² Institute for Manufacturing Technology, Technical University of Dresden, George-Baehr-Str.1, 01069 Dresden, Germany.

³ LASER-COMPACT, Laser-export Co. Ltd., Vvedenskogo St. 3, Moscow, 117342, Russia.

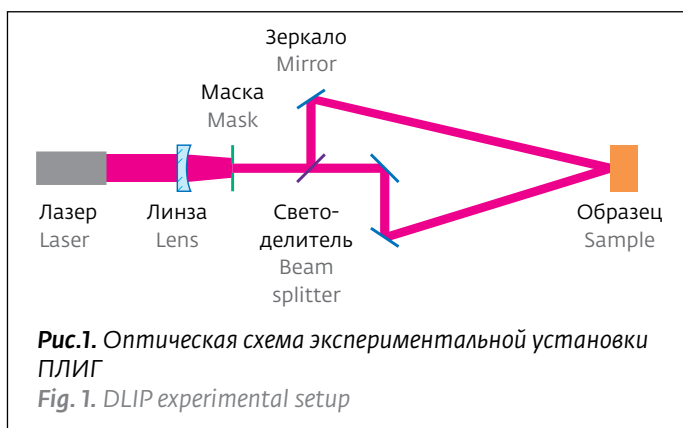
*Corresponding author, ulyanov@laser-export.com.

В настоящее время активно развивается область науки, связанная с попыткой рукотворного воспроизведения природных объектов. Лазерные технологии могут послужить средством технической реализации данной задачи, предоставляя при этом хороший экономический эффект [2, 3].

Одним из методов прецизионного нанесения периодических структур на поверхность материала за один процесс является прямая лазерная интерференционная гравировка (ПЛИГ) [4, 5]. Основа метода – это создание на поверхности материала интерференционного поля путем пересечения двух и более пучков когерентного излучения мощных импульсных лазеров, которое, при определенных условиях, приводит к возникновению субмикронных периодических структур на поверхности различных материалов. Такие поверхности потенциально интересны для промышленных, биофизических и медицинских применений. В качестве примера применения ПЛИГ можно назвать системы защиты от контрафактной продукции. ПЛИГ позволяет наносить защитные голографические метки на самые различные поверхности, которые практически невозможно подделать.

На рис.1 показана упрощенная оптическая схема экспериментальной установки ПЛИГ. Для формирования необходимых параметров пучка выходное излучение лазера проходит через фокусирующую линзу и маску. В зависимости от желаемой геометрии структуры, записываемой на поверхности, пучок после прохождения маски разделяется на два и более пучков (на рис.1 показан случай двух пучков). Далее система зеркал сводит разделенные пучки на поверхности материала под определенными углами падения [4]. В результате на поверхности материала создается интерференционная картина с заданными параметрами. На рис. 2а и 2б показаны интерференционные картины, получаемые при пересечении двух и трех пучков, соответственно. Как нетрудно заметить, размерность полученной периодической структуры при использовании $N \leq 4$ пучков равняется $(N-1)$. Таким образом, ПЛИГ с помощью изменения параметров оптической схемы, позволяет управлять как формой, так и размерностью получаемой структуры.

Благодаря простоте оптической схемы с помощью ПЛИГ можно создавать большое



That way sub-micron periodic features could be created on surfaces of various materials which could be potentially used in industrial, biophysical and medical applications. As an example DLIP could be successfully employed for product counterfeit protection. High resolution DLIP allows to apply complex security hologram-like elements on various technological surfaces which are extremely difficult to duplicate.

A basic optical diagram of DLIP experimental setup is shown in Fig.1. The laser beam exiting from the laser system aperture passes through a focusing lens and a mask for beam shaping. Depending on the intended structure geometry on the material, the resulting beam is split into two or more sub-beams by beam splitting optics (Fig. 1 illustrates a 2-beam setup). The following arrangement of mirrors merges the split sub-beams at a specific incident angle on the material surface which consequences the interference effect [4]. Depending on the incident angle and the laser beam wavelength, a periodic intensity pattern of energy maxima and minima follows. Fig. 2a and Fig. 2b illustrate the resulting laser intensity pattern for a two- and three-beam setup, respectively. The dimensionality of the resulting pattern is determined by the number N of used laser beams. A $(N-1)$ -dimensional pattern follows by interference of $N \leq 4$. Thus, a high level of degrees of freedom with respect to the shape and dimension of the structure follows which only depend on the specific DLIP setup.

Due to the relatively simple structure of the DLIP setup, a wide range of structural types (line-, pillar- and hole-like pattern) as well as periods (material-dependent; 150 nm to 30 μm) can be realized. The advantage of DLIP is that a homogeneous structuring of the material takes place over the entire surface covered by the

разнообразие структур поверхностей (линии, столбики, отверстия) и периодов их расположения (150 нм – 30 мкм, в зависимости от материала). Преимуществом ПЛИГ является то, что записываемая структура однородна на всей облучаемой поверхности. Таким образом, в зависимости от энергии импульса, может быть структурировано за один процесс несколько квадратных сантиметров поверхности, так же, как и при прямой лазерной записи. В случае, когда область записи превышает диаметр лазерного пучка, применяются системы смещения образца, например трехкоординатные подвижки.

В технологии ПЛИГ могут использоваться лазеры с различными длинами волн от инфракрасного до ультрафиолетового излучения при условии, что длина когерентности лазерного излучения достаточно большая, и обрабатываемый материал поглощает излучение с данной длиной волны. Параметры интерференционной структуры для конкретного материала зависят от длительности лазерного импульса, длины волны и свойств обрабатываемого материала, таких как глубина поглощения и скорость термической диффузии. В зависимости от совокупности данных параметров, возможны различные механизмы абляции: фотохимическая, фототермическая или фотофизическая абляция. ПЛИГ была протестирована на многих различных материалах, таких как нержавеющая сталь (304, 304L, 316, 316L), сплавы титана, алюминия, твердые металлы, никель, хром, другие стали (например, 100Cr6) и неметаллические материалы: керамика, стекла, сапфир и различные полимеры (PET, PEEK, PC, PP, PS).

Благодаря тому, что интерференционное поле имеет объемную структуру, технология ПЛИГ также может быть использована для обработки 3D-объектов. В связи с тем, что ПЛИГ не требует дополнительных процессов перед и постобработки, может работать при обычных условиях производства (чистых помещений не требуются), при этом позволяет записывать на поверхности различных материалов сложные защитные метки высокого разрешения, данная технология может быть легко интегрирована в существующие производственные линии.

Будучи бесконтактным методом обработки, ПЛИГ позволяет оптимально контролировать процесс модификации поверхности без нане-

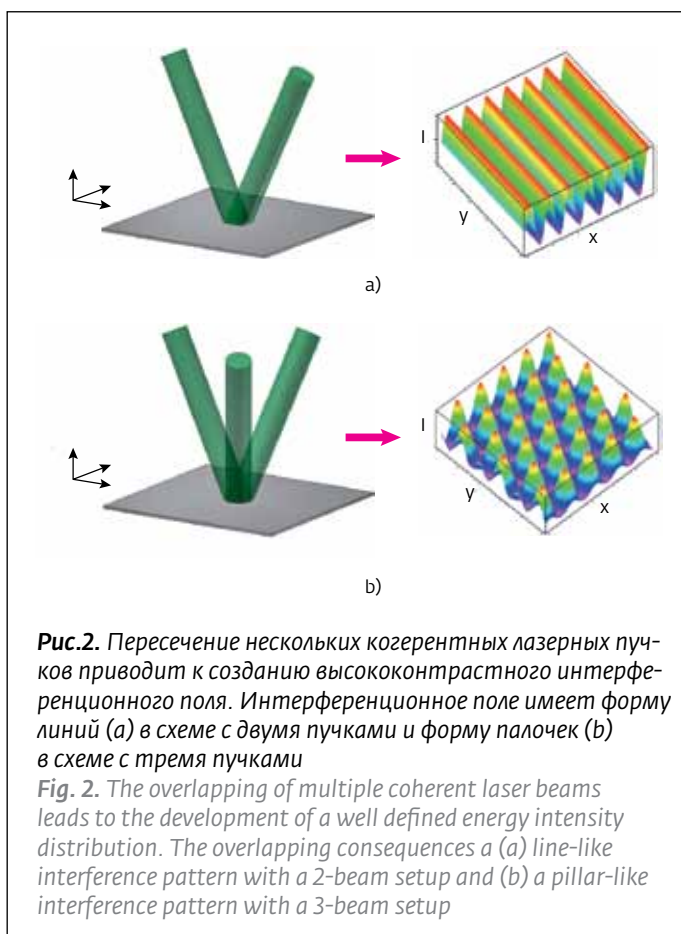


Рис.2. Пересечение нескольких когерентных лазерных пучков приводит к созданию высококонтрастного интерференционного поля. Интерференционное поле имеет форму линий (а) в схеме с двумя пучками и форму палочек (б) в схеме с тремя пучками

Fig. 2. The overlapping of multiple coherent laser beams leads to the development of a well defined energy intensity distribution. The overlapping consequences a (a) line-like interference pattern with a 2-beam setup and (b) a pillar-like interference pattern with a 3-beam setup

interfering laser beams. Hence, depending on the laser pulse energy, several cm² can be structured within a single process step when compared to direct laser writing. If the structurable area extends the laser spot size, displacement units can be employed to scan the material to be patterned. Such displacement units are, for example, specific axis systems (x, y, z-direction).

The DLIP technology is very flexible with respect to the employed laser light wavelength where different wavelengths from IR down to UV are available for an ablative modification of surfaces. A basic requirement for DLIP is a sufficiently high coherence length of the beam source as well as the absorption of the laser light through the material. In principle, the DLIP technology can process almost all materials which absorb laser light with a wavelength between deep UV (~ 0.26 μm) and IR (~ 1 μm). The material structuring largely dependent on the laser pulse duration, the employed laser wavelength and the specific material properties (such as absorption depth and thermal diffusivity) where the ablation processes can be either photochemical, photothermal or

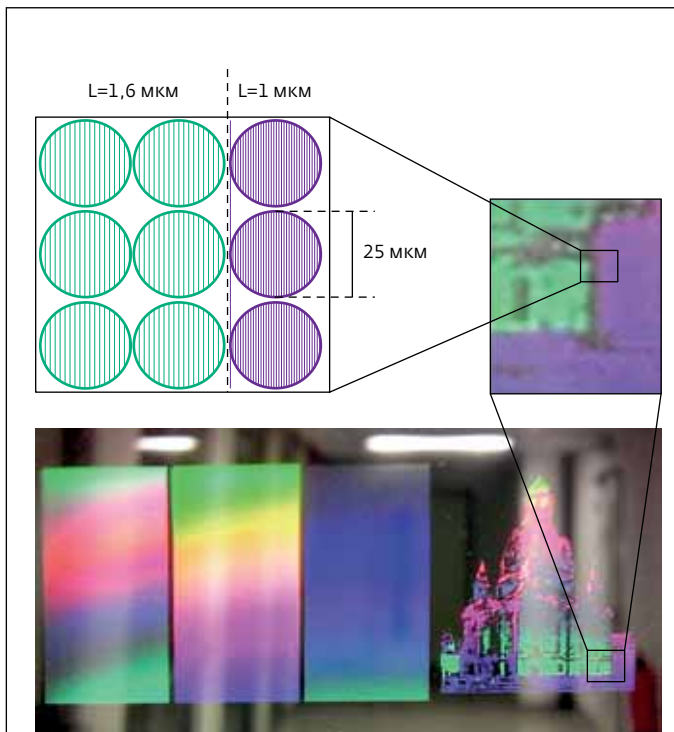


Рис.3. Тонкая PET-фольга, структурированная с помощью оптической головки ПЛИГ 4-го поколения с наносекундным 263-нм лазером. Были записаны структуры с тремя различными периодами (2,0; 1,6 и 1,0 мкм). Вариация структур с данными периодами была использована для создания изображения дрезденской церкви Фрауэнкирхе [6]

Fig. 3. Structured PET thin foil using a 4th Generation DLIP optical head with 263 nm ns laser. Three different structure periods were fabricated (2.0, 1.6 and 1.0 μm). The decorative motif of the "church of our lady" Dresden contains a variation of these different structure periods [6]

сения дополнительного материала. Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью имеет локальный характер, поэтому воздействие на область материала, находящегося под поверхностью, как правило, незначительно. Кроме того, технология ПЛИГ может быть использована в специальных условиях, например, под водой. Промышленное применение ПЛИГ возможно только в случае наличия компактной оптической головки и демонстрации работы метода в условиях промышленного производства. За последние несколько лет в Институте Фраунгофера IWS (Германия) разработаны три различные оптические головки [6] для интерференционной гравировки, предназначенные для гравировки как плоских, так и объемных объектов.



Рис.4. Никелевая пластина, структурированная наносекундным 1-мкм лазером

Fig. 4. Structured nickel plate with 1 μm ns pulsed laser

photophysical. DLIP process has been tested on many different materials such as stainless steel grades (304, 304L, 316, 316L), titanium alloys, aluminum alloys, hard metals, nickel and chrome materials, other steel materials such as 100Cr6 and non-metallic materials including ceramics, glass, sapphire and various types of polymers (PET, PEEK, PC, PP, PS).

The DLIP technology also enables a 3D machining of surfaces due to the volumetric extend of the interference pattern. As a single-process method, DLIP enables the production of high resolution and sufficiently complex security features for product protection, which can be implemented without an extensive pre- and post-treatment of the work pieces and without the need of clean room conditions. As a result, DLIP can be easily integrated in existing production lines.

Being a contactless processing method DLIP allows for an optimal process control since the material modification occurs at the material surface and without an introduction of additional material. The energy input by the laser radiation occurs locally at the material surface and typically shows a negligible influence on the underlying solid-state or substrate material. Furthermore,

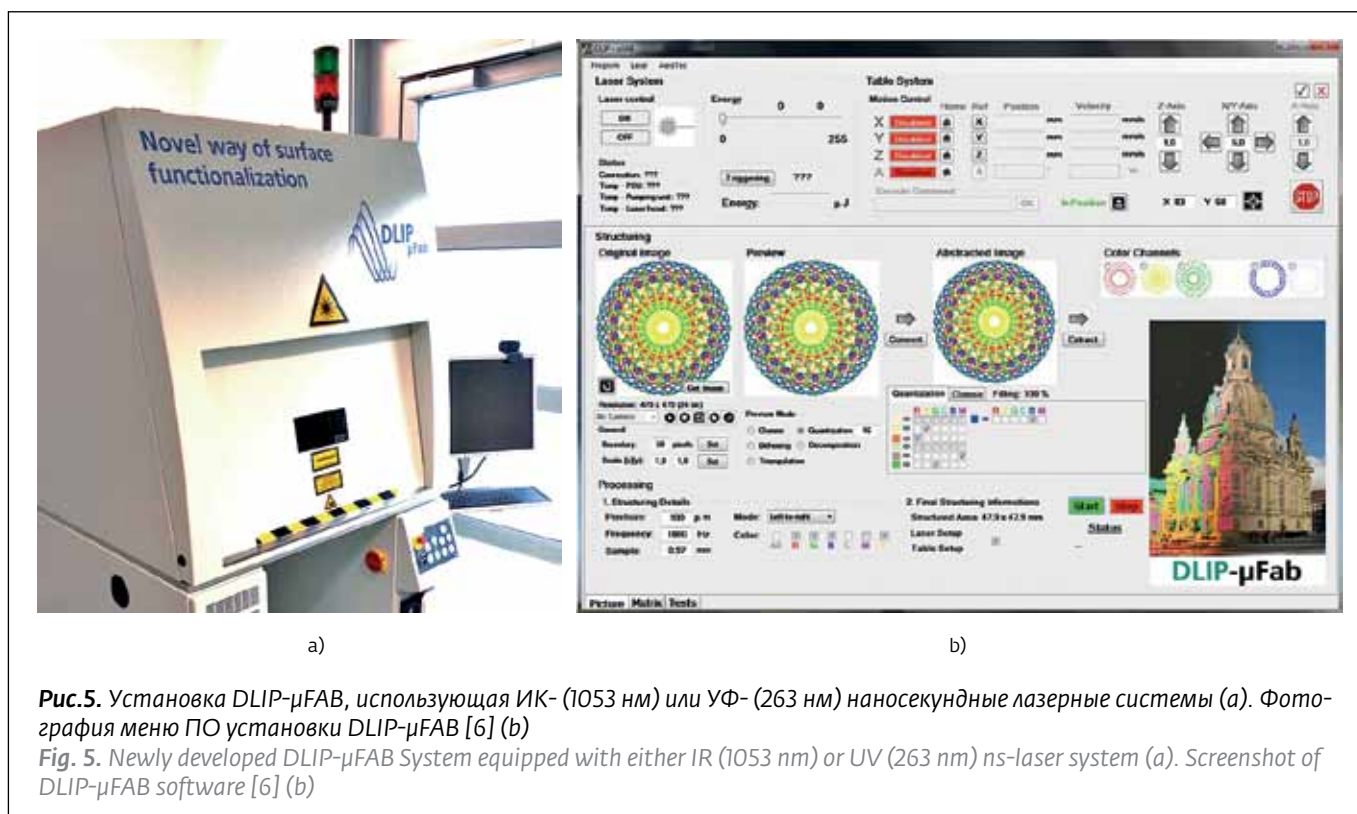


Рис.5. Установка DLIP-µFAB, использующая ИК- (1053 нм) или УФ- (263 нм) наносекундные лазерные системы (а). Фотография меню ПО установки DLIP-µFAB [6] (b)
Fig. 5. Newly developed DLIP-µFAB System equipped with either IR (1053 nm) or UV (263 nm) ns-laser system (a). Screenshot of DLIP-µFAB software [6] (b)

Одна из этих оптических головок, а именно головка 4-го поколения, была разработана специально для прецизионных применений. Она содержит в себе мобильные элементы, позволяющие автоматически контролировать угол между интерферирующими лучами. Принцип действия этой головки для ПЛИГ заключается в том, что, во-первых, все пучки, используемые для создания интерференционного поля, фокусируются на образец для получения круглой точки диаметром от 25 до 300 мкм, что соответствует разрешению 1016 и 85 DPI (количество точек на дюйм), соответственно [6]. Интерференционное поле внутри каждой точки записывается на поверхности материала. Если изменять период интерференционного поля, изменится и характеристики поверхности, например цвет отраженного света при наблюдении поверхности под определенным углом. Это продемонстрировано на рис. 3, на котором приведено фото структурированной PET-фольги, обработанной наносекундным импульсным лазером ТЕСН-263 ($\lambda=263$ нм) серии ТЕХНОЛОГИЯ производства компании ЛАЗЕР-КОМПАКТ (Россия) с максимальной энергией импульса 50 мкДж. В данном примере использовались структуры с тремя различными периодами.

the non-contact machining of DLIP even allows material processing under specific conditions (such as underwater). On the other hand, industrial application of the DLIP technology will only be possible if compact optical-head solutions are available and the applicability of the technology is demonstrated in an operational environment. In the last years, three different interference patterning optical concepts have been developed at Fraunhofer IWS (Germany) [6]. These optical heads offer the possibility not only to process planar surfaces but also complex three dimensional parts.

One of these possibilities, namely 4th Generation of DLIP optical heads, was developed to achieve high resolution and flexibility. This optical heads are equipped with mobile components that permit to control the intercepting angle between two laser beams fully automatically. The principle of operation of this DLIP-head can be described as follows. Firstly, all laser beams required to obtain the interference pattern (2, 3 or 4) are focused on the substrate obtaining a circular pixel with a diameter ranging from 25 μm to 300 μm , corresponding to resolutions of 1016 and 85 DPI (Dots Per Inch), respectively [4]. Within such a pixel, the interference pattern intensity is transferred in the materials surface. If the spatial



Рис.6. Излучатель лазера серии ТЕХНОЛОГИЯ
Fig. 6. TECHNOLOGY-series laser head

В качестве еще одного примера возможностей ПЛИГ, на рис. 4 показано фото пластины из никеля, для обработки которой использовалась головка ПЛИГ четвертого поколения с импульсным лазером TECH-1053 ($\lambda=1053$ нм) серии ТЕХНОЛОГИЯ.

Для получения поверхностных структур, показанных на рис. 3 и 4 потребовалась не только подвижка с высоким разрешением, но и специализированное программное обеспечение, позволяющее проводить обработку материала в полностью автоматическом режиме. Зрелость технологии ПЛИГ может быть продемонстрирована созданием прото-

pattern period of the pixels is varied, different functionalities can be obtained (e.g. different optical color under a specific observation angle). This principle is shown in Fig. 3 on a structured PET foil processed with TECH-263 ($\lambda=263$ nm) nanosecond pulsed TECHNOLOGY-series laser by LASER-COMPACT (Russia) (pulse energy 50 μ J). In this example, three different structure periods have been utilized to treat the polymer surface. Fig. 4 shows another example, a structured Nickel plate. It was processed by 4th Generation DLIP system with TECH-1053 ($\lambda=1053$ nm) of TECHNOLOGY-series laser.

The examples depicted in Fig. 3 and 4 require not only high resolution translational stages but also a software solution permitting the fully automatized processing of the material's surface. In addition, the maturity of the DLIP technology can only be demonstrated not only by developing optical heads, but also a prototype-system which capable to operate in an operational environment. Such a prototype (DLIP- μ FAB) including a 4th generation DLIP optical head, IR or UV laser systems, translational stages and automatized software is shown in Fig. 5. This system has been already tested over 500 h under ambient conditions (no clean room, no protective gases, non-controlled room temperature). The software platform, also developed at IWS, permits to automatically control the laser system, the optical head as well as the translational stages (Fig. 5b). The system has been classified as Laser Class 1 based on German laser safety regulations (by the Technischer Überwachungsverein, TÜV).



типа системы, способного работать в производственных условиях. На рис.5 показан такой прототип. Это установка DLIP-μFAB, включающая в себя оптическую головку четвертого поколения, ИК- и УФ- лазеры, подвижки и программное обеспечение для автоматизации. Установка прошла тестирование в течение 500 часов работы в производственных условиях (без чистого помещения, без защитных газов, без контроля температуры комнаты). Программное обеспечение, также разработанное в IWS, позволяет автоматически контролировать лазер, оптическую головку и подвижки (рис. 5b). Система была классифицирована как лазер класса 1, на основе стандарта лазерной безопасности Германии (по TÜV).

К лазерам, применяемым в прецизионной технологии ПЛИГ, предъявляются жесткие требования. Во-первых, энергия импульса должна быть достаточно высокой для того, чтобы превысить порог абляции материала по всему диаметру пятна. Типичные значения энергии равняются 100–500 мкДж на длине волны 1 мкм и 10–50 мкДж на 0,26 мкм. Необходимо идеальное качество пучка – лазер должен быть одномодовым (TEM₀₀). Для получения высокого контраста интерференционного поля длина когерентности лазерного излучения должна превышать 0,5 см на 1 мкм (0,15 см на 0,26 мкм). Для обеспечения высокой скорости процесса обработки необходима достаточно высокая частота повторений импульсов (1–5 кГц). Хорошая стабильность от импульса к импульсу также важна, потому, что она непосредственно влияет на качество записанной структуры. Габариты лазерного излучателя должны быть малы, так как необходимо, чтобы он помещался в оптическую голову системы. И, конечно, надо стремиться к тому, чтобы стоимость эксплуатации лазера была достаточно низкой, что означает низкую продажную стоимость лазера и его высокую надежность.

Лазеры серии ТЕХНОЛОГИЯ производства компании ЛАЗЕР-КОМПАКТ идеально соответствуют этим требованиям. Это – твердотельные лазеры с диодной накачкой, работающие в режиме активной модуляции добротности, которые используют кроме основной частоты также генераторы второй, третьей и четвертой гармоник. Лазеры серии ТЕХНОЛОГИЯ известны своей высокой стабильностью и надежностью. Компактные и мощ-

High resolution DLIP technology imposes stringent requirements on the laser used. First of all the pulse energy should be high enough to exceed material ablation threshold over the whole beam spot, typically 100–500 μJ at 1 μm and 10–50 μJ at 0.26 μm. Then beam quality has to be perfect, essentially a TEM₀₀ mode beam is required. Coherence length of longer than 0.5 cm at 1 μm (0.15 cm at 0.26 μm) is needed to get good interference contrast. In addition, in order to achieve high process throughput the laser pulse repetition rate needs to be sufficiently high (1-5 kHz). Good pulse-to-pulse stability is also important because it has direct impact on pattern quality. Laser head dimensions should be kept small in order to fit into the system's optical head. Last, but not the least, laser cost of operation must be relatively low, which means low purchase price and high reliability.

Lasers of TECHNOLOGY series by LASER-COMPACT perfectly fit the above criteria. These lasers are based on actively Q-switched DPSS laser technology and second, third and fourth harmonics generation. TECHNOLOGY-series lasers are known for their rugged design, high stability and reliability. Compact and powerful these lasers are new alternatives to the large, complicated and expensive high-power lasers. Fig. 6. shows a head of TECHNOLOGY laser.

CONCLUSIONS

The results reported here demonstrate the high level of maturity of the DLIP technology. If high resolution is required (e.g. holographic pixels with more than 1000 DPI resolution), compact solutions permitting to control and change patterns period automatically are available. These optical heads can be used with high energy solid state lasers as the Lasers of TECHNOLOGY series by LASER-COMPACT which provide enough coherence length to obtain interference patterns.

ACKNOWLEDGEMENT

A.Lasagni and T.Roch acknowledges the Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) and the German Research Foundation (DFG) for financial support (Verbundförderprojekt "Laser Interference High Speed Surface Functionalization" (FKZ 13N13113) and Schwerpunktprogramm "Troekenumformen-Nachhaltige Production durch Troekenebearbeitung in der Umformtechnik" (SPP 1676)). This work was also partially supported by the Fraunhofer-Gesellschaft under Grant No. Attract 692174.

ные, лазеры этой серии являются новой альтернативой громоздким, сложным и дорогим мощным лазерам. На рис. 6 приведена фотография излучателя лазера ТЕХНОЛОГИЯ.

ВЫВОДЫ

Приведенные в статье результаты продемонстрировали высокий уровень готовности технологии ПЛИГ для внедрения в производство. Была создана компактная установка ПЛИГ, позволяющая получать высокое разрешение записываемых структур (голограммоподобные точки с разрешением до 1000 DPI), имеющая автоматизированный контроль периода и формы объектов записи. В установке использованы твердотельные лазеры высокой энергии серии ТЕХНОЛОГИЯ производства компании ЛАЗЕР-КОМПАКТ, излучение которых имеет достаточную длину когерентности для получения высококачественных интерференционных полей.

БЛАГОДАРНОСТЬ

А. Лазани и Т. Роч благодарны фондам Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) и German Research Foundation (DFG) за финансовую помощь (Verbundförderprojekt "Laser Interference High Speed Surface Functionalization" (FKZ 13N13113) и Schwerpunktprogramm "Trockenumformen-Nachhaltige Production durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik" (SPP 1676)). Данную работу также спонсировал фонд Fraunhofer-Gesellschaft (Grant No. Attract 692174).

ЛИТЕРАТУРА

1. Favret E., Fuentes N.O. Characterization and tech. app. of bio-inspired surfaces.- World Scientific, 2009. P. Co.
2. Mücklich F, Lasagni A., Daniel C. - International Journal of Materials Research, 2006, v.9, p.1337.
3. Schmidt V., Beleggratis M. Laser Technology in Biomimetics: Springer Verlag, 2013.
4. Lasagni A., Yuan, D., Das S. - Adv. Eng. Mater., 2009, v.11, p. 408—411.
5. Lasagni A., Menéndez-Ormaza B. - Adv. Eng. Mater., 2010, v. 1-2, p.54.
6. Lasagni A., Roch T., Berger J., Kunze T., Lang V., Beyer E. Laser-based Micro - and Nanoprocessing IX.- Proc. of SPIE 935115-1, 2015.