

# Исследование пространственного перехода частот лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур

Р. Фюрбахер<sup>1</sup>, Г. Лидль<sup>1</sup>, С.П. Мурзин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Венский технический университет, Институт технологии производства и фотонных технологий, Гетрайдемаркт 9, Вена, Австрия, 1060

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Данное исследование демонстрирует влияние плотности энергии лазерного излучения и числа импульсов на пространственное распределение частот лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на поверхности нержавеющей стали. Так, переход от ЛИППС к более крупным самоорганизующимся периодическим конусовидным структурам был исследован. Эксперименты проводились с использованием титан-сапфировой фемтосекундной лазерной системы с центральной длиной волны 800 нм, длительностью импульса 30 фс и частотой следования импульсов 1 кГц. Экспериментальные исследования осуществлялись на плоских поверхностях холоднокатаной нержавеющей стали 1.4301 путем изменения выходной мощности лазера и скорости перемещения. Показано, что переход от ЛИППС с низкой пространственной частотой к ЛИППС с высокой пространственной частотой является непрерывным процессом, зависящим от плотности энергии одиночных импульсов и числа импульсов. При более высоких накопленных плотностях энергии может наблюдаться переход от ЛИППС к более крупным самоорганизующимся структурам. В результате создаются иерархические структуры с конусами микрометрического диапазона снизу и ЛИППС нанометрического диапазона сверху. При дальнейшем увеличении накопленной плотности энергии, канавки между микроструктурами расширяются до тех пор, пока не будет достигнут порог абляции сплава. Данные иерархические структуры могут иметь большое значение для улучшения гидрофобных свойств технических поверхностей.

## 1. Введение

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС), представляют собой самоорганизующиеся наноструктуры, которые возникают при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала вблизи его порога абляции для одиночного лазерного импульса [1]. Впервые они наблюдались в 1960-х годах после экспонирования поверхностей полупроводниковых материалов импульсным рубиновым лазером с высокой пиковой мощностью [2]. С тех пор начальные механизмы формирования ЛИППС были исследованы с использованием различных лазерных источников и материалов основы, но до сих пор они являются предметом исследований [3]. Данные поверхностные структуры получены на металлах [4], полупроводниках [2], а также на диэлектриках [5] и могут быть классифицированы в соответствии с их пространственным периодом  $\Lambda$  или отношением  $\Lambda/\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны падающего лазерного

излучения. Имеются сообщения о различных соотношениях периода к длине волны, начиная от ЛИППС с периодом больше длины волны, т.е. имеющих  $\Lambda/\lambda > 1$ , которые наблюдались на плавленом кварце [6], до ЛИППС с высокой пространственной частотой, имеющих  $\Lambda/\lambda < 0,5$  [3]. Наиболее часто используемая модель связывает образование ЛИППС с механизмом взаимодействия между падающим лазерным светом и поверхностными плазмонами, что приводит к возбуждению так называемых поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [7]. Поверхностные плазмоны могут быть описаны как колебания свободных электронов (или как электронная плазма). После возбуждения ППП представляют собой затухающие продольные ТМ-волны, которые распространяются на границе раздела металла и диэлектрика [7]. Но поскольку ППП являются затухающими волнами, согласно модели, они не могут возбуждаться непосредственно при угле падения лазерного излучения  $\theta = 0$ , так как импульс падающей световой волны ориентирован перпендикулярно плоскости поверхности [8]. Тем не менее, несмотря на эти теоретические ограничения, экспериментально показано, что ЛИППС могут быть сгенерированы и при этом условии [9].

Теоретически возбуждение ППП возможно, если либо согласованы фазовые скорости падающего света и распространяющихся плазмон-поляритонных волн [10], либо путём взаимодействия через шероховатость поверхности [11]. В работе [8] используя предварительно сформированные металлические образцы исследовано влияние начальных условий поверхности на результирующий период ЛИППС. Согласно теории плазмонов, после того, как первый лазерный импульс достигает поверхности и инициирует образование ЛИППС, дальнейшие лазерные импульсы должны уменьшать период ЛИППС. Но экспериментальные результаты не очень хорошо согласуются с теорией плазмонов.

В настоящей статье описываются экспериментальные исследования порогов образования ЛИППС и абляции нержавеющей стали в широком диапазоне значений плотностей энергии и числа импульсов. До достижения определенного порога и инициации режима абляции наблюдается не только формирование ЛИППС с различными пространственными периодами, но также переход от ЛИППС с низкой пространственной частотой (английская аббревиатура LSFL) к ЛИППС с высокой пространственной частотой (английская аббревиатура HSFL) путем разделения. При дальнейшем увеличении плотности прикладываемой энергии появляются более крупные самоорганизующиеся структуры микрометрического диапазона, в начальной стадии с ЛИППС сверху, тем самым формируются иерархические структуры. Размер и пространственное разделение этих более крупных конических структур в значительной мере зависит от накопленной плотности прикладываемой энергии. В режиме абляции увеличение числа импульсов приводит к увеличению шероховатости поверхности из-за большего количества внутренних отражений и вызывает рост микроструктур [12].

## 2. Экспериментальная установка

В данном исследовании использовались образцы холоднокатаной нержавеющей стали 1.4301 толщиной 0,05 мм в исходном состоянии, без какой-либо модификации поверхности. Измерения шероховатости поверхности согласно ISO 25178 показали среднюю арифметическую высоту  $Sa = 141,3$  нм и максимальную высоту  $Sz = 2,29$  мкм. Свойства поверхности изучались с помощью измерительной системы Alicona Infinite Focus G5. Твердотельный Ti: Sapphire лазер (Femtopower Compact Pro) использовался для инициирования генерации ЛИППС. Система функционирует с частотой 1 кГц, эмитируя импульсы 30 фс на центральной длине волны  $\lambda = 800$  нм с шириной полосы  $\pm 50$  нм. Лазер предоставляет излучение со средней выходной мощностью 800 мВт, что обеспечивает энергию одиночного импульса 0,8 мДж. Посредством внутренней настройки выходное излучение линейно поляризовано. Для регулировки плотности лазерного излучения на поверхности образцов использовали переменный аттенюатор. Выходя из аттенюатора, лазерный луч затем фокусировался на образце с помощью внеосевого параболического зеркала с защитным серебряным покрытием. Чтобы исключить влияние эффектов астигматизма, вызванного использованием выпуклого фокусирующего зеркала, заготовка не перемещалась в направлении падающего лазерного луча при проведении экспериментов (угол падения излучения равен 0). Эксперименты проводились на воздухе при температуре 21°C и влажности 40..45 %. Чтобы изучить влияние плотности энергии и числа импульсов на формирование ЛИППС, заготовка была установлена на линейной платформе с приводом от двигателя и перемещалась с различными

скоростями подачи вдоль горизонтальной оси. Поскольку максимальная скорость подачи была ограничена до 8 мм/с, диаметр луча был регулирован до  $d = 295$  мкм с целью достижения желаемого диапазона плотности энергии на образце. После индуцирования наноструктур на поверхностях, образцы очищали деминерализованной водой в ультразвуковой ванне и исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JCM-5000, FEI Quanta 250 FEG. Чтобы изучить начало генерации ЛИППС, анализ концентрировался на тех областях, где лазерный луч гауссова распределения интенсивности имеет максимум. SEM-изображения затем анализировали в направлении, перпендикулярном ориентации ЛИППС, с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) в Matlab. Используя инструмент Matlab Signal Analyzer Tool, результаты БПФ были дополнительно исследованы путем поиска пиков в частотном спектре. Данные пики могут быть интерпретированы как благоприятные пространственные периоды ЛИППС, а амплитуда дает представление об их характеристиках. Для исследования перехода LSFL в HSFL представляет интерес соотношение пиковых значений амплитуд. Повышения величины соотношения указывает на то, что HSFL являются более благоприятными, что также было подтверждено визуально по SEM-изображениям. Плотность прикладываемой энергии варьировалась от  $\phi = 0,02$  Дж/см<sup>2</sup> до  $0,9$  Дж/см<sup>2</sup>, число импульсов от  $n = 37$  до  $n = 1030$ . Для анализа сформированных канавок и конусообразных структур при более высоких энергиях импульса оценивали долю площади канавок и средний диаметр основания конусов. С этой целью изучались SEM-изображения соответствующих областей поверхности  $50$  мкм  $\times$   $50$  мкм с использованием программного обеспечения ImageJ.

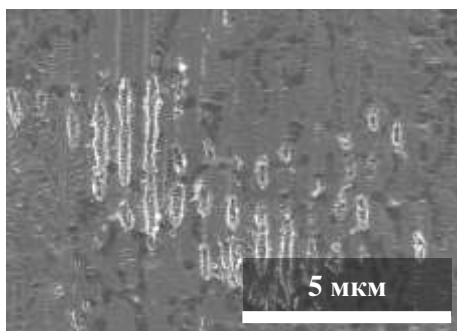
### 3. Результаты и обсуждение

Согласно теории плазмонов, пространственный период лазерно-индуцированных поверхностных структур зависит от длины волны  $\lambda$  используемого лазерного излучения и свойств поверхности раздела материала [13]:

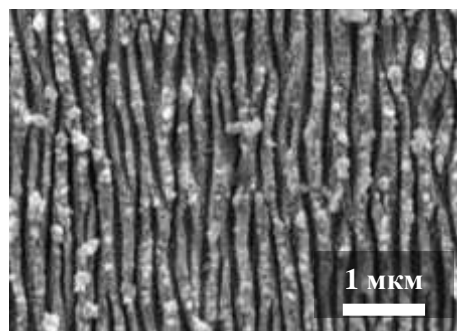
$$\Lambda_{\text{ЛИППС}} = \frac{\lambda}{\eta \pm \sin \theta} \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол падения лазерного излучения, а  $\eta$  – действительная часть эффективного индекса поверхностной плазмонной моды. Для границы раздела воздух/металл значение  $\eta$  обычно приблизительно равно 1 [13]. Это означает, что лазерным источником будет индуцирован только один пространственный период  $\Lambda \approx \lambda$ . В работе [3] описано, что вследствие увеличения глубины структуры и других эффектов, таких как многоимпульсные явления обратной связи, уравнение (1) справедливо только для небольшого числа импульсов. Полученные нами экспериментальные результаты показывают, что период LSFL изменяется в пределах  $\Lambda_{\text{LSFL}} = 655$  нм для широкого диапазона чисел импульсов  $37 \leq n \leq 1030$ , что значительно меньше значения центральной длины волны лазерного излучения  $\lambda = 800$  нм. Установлено, что ориентация ЛППС на используемых образцах из стали перпендикулярна направлению поляризации линейно поляризованного лазерного источника, что согласуется с наблюдениями других авторов для различных металлов [3, 12, 14]. Наблюдалась инициализация формирования ЛИППС с пространственным периодом 650 нм при энергии плотности одиночного импульса  $\phi = 0,04$  Дж/см<sup>2</sup> и  $n = 37$  импульсов соответственно (рисунок 1). Эксперименты также проводились при более низкой плотности энергии  $\phi = 0,02$  Дж/см<sup>2</sup>, которая оказалась ниже порога образования ЛИППС в стали 1.4301.

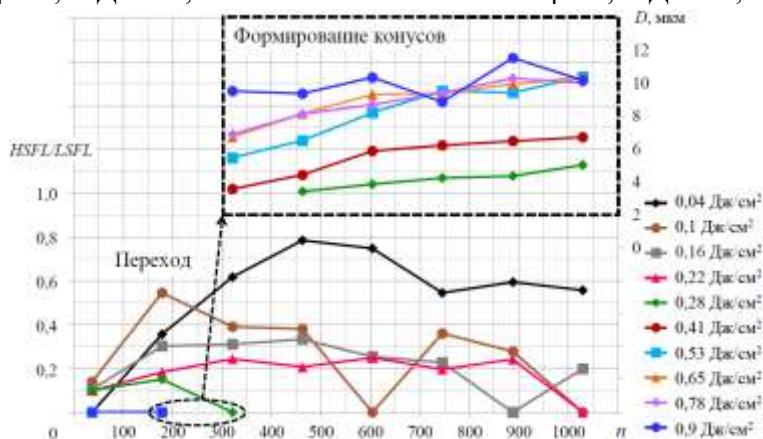
Увеличение числа импульсов до  $n = 178$  при сохранении постоянного уровня плотности при  $\phi = 0,04$  Дж/см<sup>2</sup> приводило к увеличению площади структурирования с образованием только LSFL. При дальнейшем увеличении числа прикладываемых импульсов происходит разделение LSFL (рисунок 2), что приводит к одновременному образованию HSFL с пространственным периодом  $\Lambda/\lambda < 0,5$ . Этот процесс разделения и его зависимость от плотности энергии и числа импульсов были описаны многими авторами [15, 16]. Соотношение между HSFL и LSFL можно регулировать, изменяя число импульсов (рисунок 3). Максимальное соотношение амплитуд HSFL/LSFL, равное 78 %, достигается при  $\phi = 0,04$  Дж/см<sup>2</sup> и  $n = 462$  импульса. При дальнейшем увеличении числа импульсов соотношение уменьшается и становится меньше 60 %. При более высоком уровне плотности энергии  $\phi = 0,1$  Дж/см<sup>2</sup> процесс разделения не столь отчетлив, но зависимость от числа импульсов очевидна, достигая максимума 55 % при  $n = 178$  импульсов.



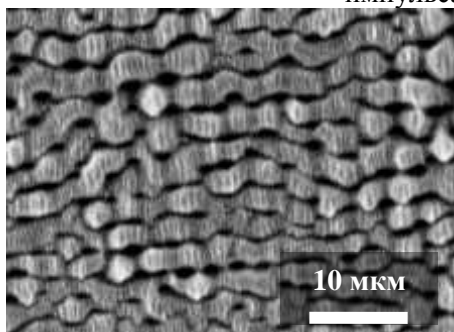
**Рисунок 1.** Фаза инициализации формирования ЛИППС:  $\phi = 0,04 \text{ Дж/см}^2$ ,  $n = 37$ .



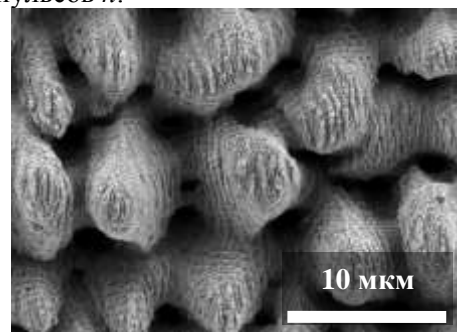
**Рисунок 2.** Разделение LSFL в HSFL:  $\phi = 0,04 \text{ Дж/см}^2$ ,  $n = 462$ .



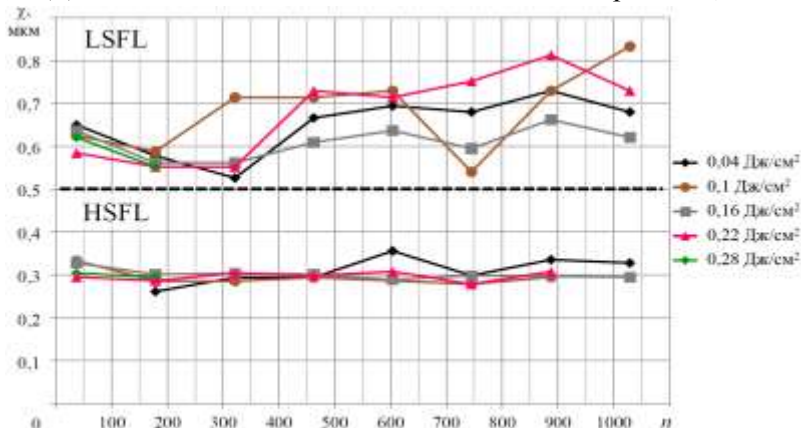
**Рисунок 3.** Вверху: переход от LIPSS к коническим структурам:  $D$  – диаметр основания конуса. Внизу: зависимость соотношения амплитуд HSFL/LSFL от энергии плотности лазерного импульса и числа импульсов  $n$ .



**Рисунок 4.** Образование канавок:  $\phi = 0,78 \text{ Дж/см}^2$ ,  $n = 178$ .



**Рисунок 5.** Иерархические структуры – конусы с ЛИППС на вершине:  $\phi = 0,53 \text{ Дж/см}^2$ ,  $n = 321$ .



**Рисунок 6.** Период ЛИППС  $\chi$  при различных плотностях лазерной энергии и числе импульсов  $n$ .

На рисунке 3 показано, что для плотности энергии  $\phi = 0,28 \text{ Дж/см}^2$  и малого числа импульсов соотношение HSFL/LSFL уменьшается и составляет 15 %, предоставляя начало перехода LIPSS/конус при  $n > 321$ . При ещё более высоких плотностях энергии и числах импульсов  $n < 321$ , HSFL вообще не образуется, в образце остаются только LSFL. Рассматривая влияние числа импульсов на пространственные периоды ЛИППС, для более низких плотностей энергии ( $\phi$  составляет от 0,04 до 0,28 Дж/см<sup>2</sup>) результаты показывают небольшие колебания около среднего значения  $\Lambda_{\text{LSFL}} = 655 \text{ нм}$  с тенденцией к более высоким пространственным периодам для больших числах импульсов (рисунок 6). Этот факт не поддерживается теорией решётчного поверхностного плазмонного взаимодействия, согласно которой период ЛИППС должен уменьшаться при больших числах импульсов [3, 17]. Результаты, представленные на рисунке 6, не указывают на какое-либо существенное отклонение от среднего значения периода HSFL:  $\Lambda_{\text{HSFL}} = 300 \text{ нм}$  в широком диапазоне чисел импульсов, но при большем числе импульсов пики в спектрах БПФ не являются выраженными.

Помимо формирования LSFL и HSFL, SEM-изображения иллюстрируют инициализацию и постоянный рост так называемых канавок [18], которые являются областями абляции между ЛИППС, ориентированными параллельно поляризации лазерного излучения (рисунок 4). Их рост напрямую связан с приложенной плотностью энергии и числом импульсов и приводит к образованию конусов (рисунок 7). Полученные экспериментальные результаты показывают, что образование конусов начинается при плотности энергии больше  $\phi = 0,28 \text{ Дж/см}^2$  и числах импульсов  $n > 178$  (рисунок 3). Поскольку переход от канавок к конусам продолжается, ЛИППС всё еще видны. При дальнейшем увеличении плотности энергии и числа импульсов, ЛИППС исчезают и амплитуды частот в спектре БПФ ослабевают до тех пор, пока они не становятся неотличимыми от шума. Средний размер зерна или базовый диаметр конусов не только связан с плотностью энергии одиночного импульса или числом импульсов, но и пропорционален их произведению - накопленной плотности энергии (рисунок 7). Можно видеть, что корреляция не является линейной, и размер зерна стремится к предельному при значении около 11 мкм для накопленных плотностей энергии выше  $\phi_{\text{Acc}} = 600 \text{ Дж/см}^2$ . Образование или самоорганизация наблюдаемых структур может быть следствием более высоких скоростей абляции на границах зерен сплава 1.4301, обрабатываемого лазерным излучением [19]. При критической накопленной плотности энергии  $\phi_{\text{Acc\_crit}} \approx 1400 \text{ Дж/см}^2$  абляция является доминирующей и удаляет все поверхностные структуры, оставляя только чистый разрез в металлическом листе.



**Рисунок 7.** Корреляция между относительной площадью канавки  $S$ , диаметром основания конуса  $D$  и накопленной плотностью лазерной энергии  $\phi_{\text{Acc}}$ .

#### 4. Заключение

В этом исследовании экспериментально исследованы процессы, которые приводят к образованию LSFL, HSFL, канавок и конусных структур, и установлено, что происходят непрерывные переходы между наблюдаемыми структурами, а резкие изменения не могут быть обнаружены. Тем не менее, определены некоторые пороговые уровни для плотности энергии и числа импульсов, при которых инициируются данные переходы (таблица 1).

**Таблица 1.** Пороговые уровни для структурных переходов на нержавеющей стали 1.4301.

Переход	Пороговая плотность энергии, $\Phi$ [Дж/см <sup>2</sup> ]	Пороговое число импульсов, $n$
Инициализация формирования ЛИППС	0.04	37
Формирование HSFL	0.04	178
Пиковое соотношение HSFL/LSFL	0.04	462
Формирование мелких канавок	0.04	888
Абляция приводит к образованию конусов	0.28	604
Абляция приводит к удалению	0.94	1500

Анализ полученных данных показывает, что параллельно могут индуцироваться ЛИППС с низкой и, в процессе разделения, с высокой пространственной частотой. На соотношение LSFL/HSFL влияют параметры лазерного излучения, поэтому оно может регулироваться в определенном диапазоне. При низких уровнях плотности энергии, ЛИППС образуются только на небольших участках поверхности образцов, что обусловлено гауссовым распределением интенсивности используемого лазерного луча. Применение более высокой плотности энергии увеличивает площадь ЛИППС, но при этом соотношение HSFL/LSFL уменьшается. Принимая во внимание данный эффект, структурирование больших площадей с помощью HSFL приводит к длительному времени обработки, если только это не будет компенсировано путем изменения распределения интенсивности лазерного излучения от гауссового до равномерного.

Дальнейшие исследования могут выявить определенный диапазон параметров, при котором разделение LSFL происходит с высокой эффективностью и образуются только HSFL. Принимая во внимание рост канавок и конусов, глубина структуры может являться подходящим индикатором для более детального изучения процесса абляции. Также следует учитывать границы зерна материала. Топология индуцированных структур может быть весьма полезна для улучшения гидрофобных свойств технических поверхностей. Из-за высокого соотношения поверхности к площади грубые и глубокие конусовидные структуры имеют сходство с листьями лотоса и, следовательно, могут обуславливать гидрофобные свойства.

## 5. Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить г-на Михаэля Ниртля за предоставление доступа к необходимому оборудованию для метрологии поверхности. Мы также выражаем благодарность Университетскому сервисному центру трансмиссионной электронной микроскопии (USTEM) Венского технического университета за поддержку в области растровой электронной микроскопии. Авторы благодарны за поддержку проекта FFG-NR. 871733 NICE со стороны Фонда климата и энергетики и Австрийского агентства содействия исследованиям.

## 6. Литература

- [1] Nürnberger, P. Influence of substrate microcrystallinity on the orientation of laser-induced periodic surface structures / P. Nürnberger, H. Reinhardt, H.C. Kim, F. Yang, K. Peppler, J. Janek, N. Hampp // *J. Appl. Phys.* – 2015. – Vol. 118(13). – P. 134306. DOI: 10.1063/1.4932215.
- [2] Birnbaum, M. Improving formability of laser welded automotive dual phase steels with local cooling // *J Appl. Phys.* – 1965. – Vol. 36(11). – P. 3688-3689. DOI: 10.1063/1.1703071.
- [3] Bonse, J. Laser-induced periodic surface structures – A scientific evergreen / J. Bonse, S. Höhm, S.V. Kirner, A. Rosenfeld, J. Krüger // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2017. – Vol. 23(3). – P. 7581030. DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2614183.
- [4] Giannuzzi, G. Large area laser-induced periodic surface structures on steel by bursts of femtosecond pulses with picosecond delays / G. Giannuzzi, C. Gaudiuso, C. Di Franco, G. Scamarcio, P.M. Lugara, A. Ancona // *Opt. Lasers Eng.* – 2019. – Vol. 114. – P. 15-21. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.10.006.

- [5] Schwarz, S. Surface plasmon polariton triggered generation of 1D-low spatial frequency LIPSS on fused silica / S. Schwarz, S. Rung, C. Esen, R. Hellmann // *Appl. Sci.* – 2018. – Vol. 8(9). – P. 1624. DOI: 10.3390/app8091624.
- [6] Tsibidis, G.D. Convection roll-driven generation of supra-wavelength periodic surface structures on dielectrics upon irradiation with femtosecond pulsed lasers / G.D. Tsibidis, E. Skoulas, A. Papadopoulos, E. Stratakis // *Phys. Rev. B* – 2016. – Vol. 94(8). – P. 081305. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.081305.
- [7] Martsinovskii, G.A. Ultrashort excitations of surface polaritons and waveguide modes in semiconductors / G.A. Martsinovskii, G.D. Shandybina, D.S. Smirnov, S.V. Zobotnov, L.A. Golovan, V.Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov // *Opt. Spectrosc.* – 2008. – Vol. 105(1). – P. 67-72. DOI: 10.1134/S0030400X08070114.
- [8] Gurevich, E.L. Laser Induced Periodic Surface Structures induced by surface plasmons coupled via roughness / E.L. Gurevich, S.V. Gurevich // *Appl. Surf. Sci.* – 2014. – Vol. 302. – P. 118-123. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.10.141.
- [9] Liedl, G. Features of changes in the nanostructure and coloring of copper during scanning with a femtosecond laser beam / G. Liedl, R. Pospichal, S.P. Murzin // *Computer Optics.* – 2017. – Vol. 41(4). – P. 504-509. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-504-509.
- [10] Otto, A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // *Zeitschrift für Physik.* – 1968. – Vol. 216(4). – P. 398-410. DOI: 10.1007/BF01391532.
- [11] Zhou, K. Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot / K. Zhou, X. Jia, T. Jia, K. Cheng, K. Cao, S. Zhang, D. Feng, Z. Sun // *J. Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 121(10). – P. 104301. DOI: 10.1063/1.4978375.
- [12] Raillard, B. Ablation effects of femtosecond laser functionalization on surfaces / B. Raillard, F. Mücklich // *Laser Surface Engineering: Processes and Applications.* – 2015. – P. 565-581. DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00024-6.
- [13] Garrelie, F. Evidence of surface plasmon resonance in ultrafast laser-induced ripples / F. Garrelie, J.P. Colombier, F. Pigeon, S. Tonchev, N. Faure, M. Bounhalli, S. Reynaud, O. Parriaux // *Opt. Express* – 2011. – Vol. 19(10). – P. 9035-9043. DOI: 10.1364/OE.19.009035.
- [14] Gräf, S. Polarisation-dependent generation of fs-laser induced periodic surface structures / S. Gräf, F.A. Müller // *Appl. Surf. Sci.* – 2015. – Vol. 331(29493). – P. 150-155. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.01.056.
- [15] Zhang, W. Abrupt transition from wavelength structure to subwavelength structure in a single-crystal superalloy induced by femtosecond laser / W. Zhang, G. Cheng, Q. Feng, L. Cao, F. Wange, R. Hui // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – Vol. 257(9). – P. 4321-4324. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.12.050.
- [16] Hou, S. Formation of long- and short-periodic nanoripples on stainless steel irradiated by femtosecond laser pulses / S. Hou, Y. Huo, P. Xiong, Y. Zhang, S. Zhang, T. Jia, Z. Sun, J. Qiu, Z. Xu // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 44(50). – P. 505401. DOI: 10.1088/0022-3727/44/50/505401.
- [17] Huang, M. Origin of laser-induced near-subwavelength ripples: interference between surface plasmons and incident laser / M. Huang, F. Zhao, Y. Cheng, N. Xu, Z. Xu // *ACS Nano.* – 2009. – Vol. 3(12). – P. 4062-4070. DOI: 10.1021/nn900654v.
- [18] Nivas J.J. Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q-plate / J.J. Nivas, S. He, A. Rubano, A. Vecchione, D. Paparo, L. Marrucci, R. Bruzese, S. Amoruso // *Sci. Rep.* – 2015. – Vol. 5. – P. 17929. DOI: 10.1038/srep17929.
- [19] Ribeiro, R.M. Modelling of surface evaporation by laser ablation / R.M. Ribeiro, M.M.D. Ramos, A.M. Stoneham, J.M.C. Pires // *Appl. Surf. Sci.* – 1997. – Vol. 109-110. – P. 158-161. DOI: 10.1016/S0169-4332(96)00747-7.

## Research of spatial frequency transition of laser induced periodic surface structures

R. Fuerbacher<sup>1</sup>, G. Liedl<sup>1</sup>, S.P. Murzin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>TU Wien, Institute of Production Engineering and Photonic Technologies, Getreidemarkt 9, Vienna, Austria, 1060

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** This research shows the influence of laser fluence and pulse number on the spatial frequency distribution of laser induced periodic surface structures (LIPSS) on a stainless steel surface. Also the transition of LIPSS to larger self organized, periodic, cone-like structures has been investigated. Experiments were carried out using a Ti:Sapphire femtosecond laser system with 800 nm centre wavelength, a pulse duration of 30 fs and a repetition rate of 1 kHz. Experiments have been carried out on flat, cold-rolled stainless steel surfaces (1.4301) by variation of the laser output power and feed rate. It could be shown, that the transition of low spatial frequency LIPSS to high spatial frequency LIPSS is a continuous process, strongly depending on the laser single pulse fluence and the pulse number. At higher accumulated fluences the transition of LIPSS to larger self organized structures could be observed. As a result, hierarchical structures were created with micrometer-sized cones at the bottom and nanometer-sized LIPSS on top. By further increasing the accumulated fluence, the grooves between the micro structures are widened until the ablation threshold of the alloy is reached. These hierarchical structures could be of considerable value in improving hydrophobic properties of technical surfaces.