

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО ФОКУСАТОРА ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С НЕПРЕРЫВНЫМ ДИФРАКЦИОННЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ

К.Н. Тукмаков^{1, 2, 3}, М.С. Комленок^{3, 4}, В.С. Павельев^{1, 2}, Т.В. Кононенко^{3, 4}, В.И. Конов^{3, 4}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия,

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Аннотация

Разработан и успешно применен метод высокочастотной лазерной абляции с использованием двухкоординатного сканатора луча для создания дифракционного оптического элемента терагерцового диапазона с непрерывным микрорельефом. Приведены результаты исследования микрорельефа полученного кремниевого фокусатора Гауссова пучка в квадратную область.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, лазер на свободных электронах, терагерцовое излучение, лазерная абляция.

Цитирование: Тукмаков, К.Н. Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевого фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом / К.Н. Тукмаков, М.С. Комленок, В.С. Павельев, Т.В. Кононенко, В.И. Конов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 941-946. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-941-946.

Введение

Появление новых источников в терагерцовом диапазоне, в том числе мощных, таких как лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [1], требует развития и совершенствования соответствующей элементной базы для управления пучками такого излучения. Значительное количество работ [2–4] посвящено созданию линз и дифракционных решеток терагерцового диапазона, однако эффективное применение когерентного терагерцового излучения требует создания элементов с более широкими функциональными возможностями, в частности, во многих приложениях необходима фокусировка пучка в заданные двух- и трехмерные области (формирование равномерного распределения интенсивности в заданной области, фокусировка в соосный отрезок и т.д.). В случае создания элементов для управления мощными пучками большое значение имеет выбор материала подложки. В работе [5] показано, что применение полимерных элементов для этих целей ограничено в силу их невысокой лучевой стойкости. В [4] приведены результаты исследования силовых бинарных линз и делителей пучка терагерцового диапазона, изготовленных с помощью технологии однократного травления подложки из высокоомного кремния. После формирования дифракционного микрорельефа на одной из сторон подложки на обе поверхности элемента наносилось антиотражающее покрытие [4]. Исследование изготовленных элементов [4] показало их высокую лучевую стойкость (свыше 4 кВт/см²), однако они обладали невысокой энергетической эффективностью в силу бинарного (двухуровневого) дифракционного микрорельефа (теоретическая оценка для энергетической эффективности бинарной дифракционной линзы, например, составляет 41% [6]). В [7] приведены результаты исследования бинарного кремниевого элемента, предназначенного для фокусировки Гауссова пучка терагер-

цового лазера в квадрат и изготовленного с помощью технологии, описанной в [4]. Расчетная энергетическая эффективность бинарного фокусатора в квадрат в [7] составляла 55%.

Повысить энергетическую эффективность элементов, изготовленных с помощью травления, можно с помощью увеличения числа уровней квантования рельефа, что повлечет за собой серьезное удорожание и усложнение технологии изготовления. Альтернативный подход, впервые продемонстрированный в работе [8] на примере изготовления четырехуровневой дифракционной линзы, заключается в применении лазерной фемтосекундной абляции для формирования многоуровневого терагерцового дифракционного микрорельефа на поверхности кремниевой пластины. В более поздней работе [9] с помощью аналогичного подхода изготовлена дифракционная линза с микрорельефом, близким к непрерывному. Данная работа посвящена формированию и исследованию непрерывного дифракционного микрорельефа кремниевого фокусатора Гауссова пучка лазера терагерцового диапазона в фокальную область в форме квадрата с помощью высокочастотной лазерной абляции импульсами с пикосекундной длительностью. Выбор лазерного источника с короткой длительностью импульса обусловлен большей производительностью и образованием меньшего бруствера вокруг зоны абляции по сравнению с наносекундной длительностью [10].

1. Расчет и формирование дифракционного микрорельефа

Фокусатор Гауссова пучка терагерцового лазера в область фокусировки в форме квадрата был рассчитан с помощью метода, описание которого приведено в [11]. Элемент был рассчитан для следующего набора параметров: модовый радиус Гауссова

освещающего пучка $\sigma = 11$ мм, диаметр апертуры $D = 50$ мм, размер стороны фокальной области в форме квадрата $a = 8,6$ мм, фокусное расстояние $f = 200$ мм, рабочая длина волны $\lambda = 130$ мкм. На рис. 1 представлен результат расчета микрорельефа фокусатора, в котором максимальная глубина составляет 53,7 мкм и соответствует черному цвету на рисунке, размер пикселя 5 мкм).

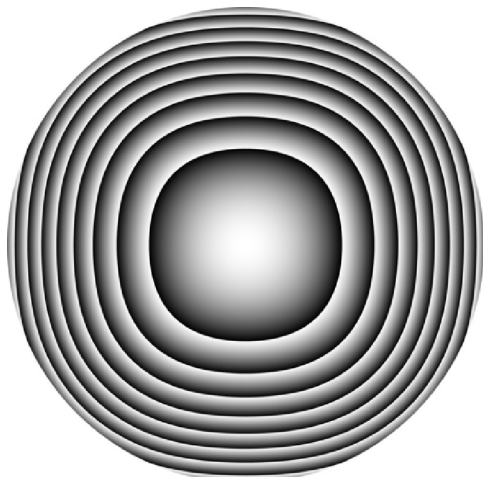


Рис. 1. Рассчитанный микрорельеф фокусатора

Для структурирования поверхности кремния использовался высокочастотный (200 кГц) дисковый лазер Yb:YAG ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 1$ пс), который обеспечил необходимую производительность процесса абляции на большой площади и глубине, а также продемонстрировал лучшее качество обработки поверхности по сравнению с УФ эксимерным лазером с наносекундной длительностью импульса [12]. Для создания необходимого рельефа использовался высокоскоростной гальванометрический двухкоординатный сканатор, который позволяет управлять движением лазерного луча при высоких частотах следования импульсов. Фокусировка излучения производилась с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 мм. В экспериментах использовался минимальный шаг сканирования луча по поверхности, который составлял 10,9 мкм.

Для определения оптимального режима облучения были созданы тестовые структуры с варьированием мощности лазерного излучения от 4 до 8 Вт, числа импульсов на точку и числа сканирований. Анализ глубин и шероховатостей созданных структур показал, что наведенная шероховатость на дне кратеров вызвана в основном недостаточным перекрытием соседних пятен при сканировании. Гауссов диаметр пятна на поверхности составлял 23 мкм. Ввиду того, что шаг сканирования нельзя было сделать меньше 10,9 мкм, было принято решение увеличить размер пятна на поверхности с помощью дефокусировки пучка. Так, при дефокусировке на 2 мм и мощности 6,4 Вт (соответствующей 7,7 Дж/см² без отклонения от фокальной плоскости) глубина тестовой структуры после 40 сканирований уменьшилась с 72 до 46 мкм, а зна-

чение шероховатости R_a – с 6 до 1 мкм. При этом уменьшение шероховатости не может быть объяснено лишь уменьшением плотности энергии в импульсе и глубины тестовой структуры, т.к. без дефокусировки пучка не удавалось получить значение шероховатости $R_a = 1$ мкм при глубинах более 10 мкм. Возможным фактором, оказавшим влияние на уменьшение шероховатости поверхности, помимо увеличения степени перекрытия соседних пятен, является уменьшение доступа кислорода в зону абляции вследствие увеличения лазерного пятна. Согласно исследованиям, проведенными Т. Нег и др. [13], при абляции кремния в инертной среде уменьшается острота конусов, образующихся на дне облученной зоны, что должно уменьшить шероховатость поверхности.

На основании проведенных предварительных экспериментов была создана программа, преобразующая исходные данные, представляющие собой массив значений глубины по координатам сетки (изображенный на рис. 1), в аналогичный массив данных о времени экспозиции по координатам для послойного формирования необходимого рельефа фокусатора на поверхности кремния. Послойное рисование было продиктовано соображениями сглаживания рельефа и поэтапным выполнением всего эксперимента, который в общей сложности занимал 31 час. В результате заданный рельеф был разбит на 6 слоев, глубина 5 из которых составляла 10 мкм и последнего – 3,7 мкм. Каждый слой, за исключением последнего, формировался за 6 проходов лазерного излучения с мощностью 7 Вт, последний – за 2 прохода с мощностью 7,1 Вт. На рис. 2 приведено фото изготовленного фокусатора.

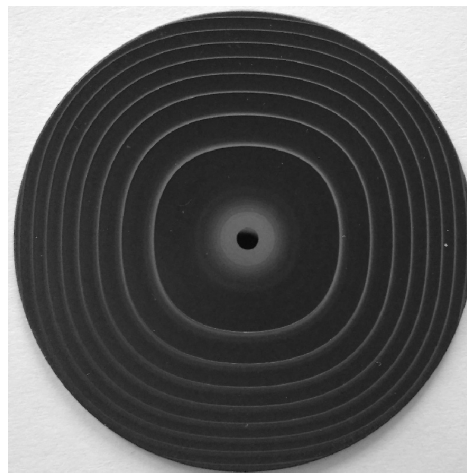


Рис. 2. Фото изготовленного фокусатора диаметром 50 мм

2. Исследование изготовленного дифракционного микрорельефа

Исследования поверхности структурированного кремния проводились с помощью интерференционного микроскопа Zygo, NewView 5000 и растрового электронного микроскопа FEI Quanta 200. На рис. 3 представлены результаты расчета и экспериментального измерения с помощью интерференционного

микроскопа профиля микрорельефа вдоль центрального сечения фокусатора. На изображении отчетливо видны зоны Френеля, представляющие собой непрерывный микрорельеф. Сравнение результатов расчета и измерений (рис. 3) демонстрирует высокую степень соответствия.

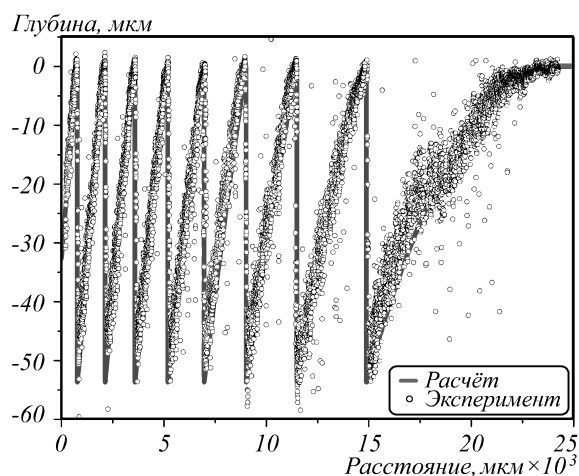


Рис. 3. Результаты расчета и экспериментального измерения с помощью интерференционного микроскопа профиля микрорельефа кремниевого фокусатора

Анализ зоны лазерной обработки на растровом электронном микроскопе показал наличие конусов, наблюдаемых и прежде другими авторами [14, 15]. На рис. 4а приведено изображение ступени, образованной между соседними зонами Френеля, на котором видна разница в размере возникших конусов на максимальной и минимальной глубинах рельефа. Из чего можно сделать вывод, что размер наведенных структур увеличивается с ростом числа лазерных импульсов. Увеличенное изображение рельефа на максимальной глубине представлено на рис. 4б. Оценка максимальной высоты образованного конуса составляет около 10 мкм.

Заключение

На основании проведенного исследования влияния параметров лазерного облучения на морфологию поверхности кремния определены оптимальные условия для создания фокусатора с непрерывным дифракционным микрорельефом.

Разработан и успешно применен метод высокочастотной лазерной абляции с применением двухкоординатного сканатора луча для создания дифракционного элемента терагерцового диапазона с непрерывным профилем. Морфология полученного фокусатора проанализирована на интерференционном и растровом электронном микроскопах. Результаты исследования поверхности изготовленного элемента находятся в хорошем соответствии с результатами расчета.

Проведенные эксперименты показали перспективность применения метода лазерной абляции кремниевой поверхности для создания дифракционных оптических элементов терагерцового диапазона с непрерывным микрорельефом.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант №17-32-50094 «мол_нр»). Анализ морфологии поверхности с помощью электронной микроскопии выполнен при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Авторы выражают благодарность Б.А. Князеву и Ю.Ю. Чопоровой за рекомендации при выборе расчетных параметров фокусатора.

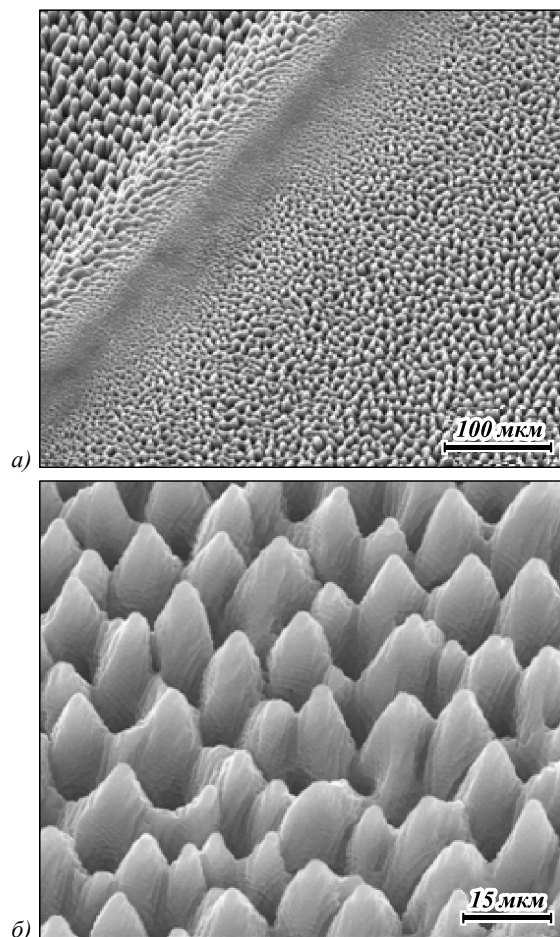


Рис. 4. Изображения поверхности фокусатора после лазерной обработки, полученные на электронном микроскопе: ступени между соседними зонами Френеля (а); в самой глубокой области микрорельефа (б)

Литература

1. **Kulipanov, G.N.** Novosibirsk free electron laser-facility description and recent experiments / G.N. Kulipanov, E.G. Bagryanskaya, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Ya.V. Getmanov, S.L. Kiselev, B.A. Knyazev, S.E. Peltek, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Seredniakov, O.A. Shevchenko, A.N. Skrinisky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2015. – Vol. 5, Issue 5. – P. 798-809. – DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
2. **Walsby, E.D.** Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves / E.D. Walsby, S. Wang, J. Xu, T. Yuan, R. Blaikie, S.M. Durbin, X.-C. Zhang, D.R.S. Cumming //

- Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2002. – Vol. 20, Issue 6. – 2780. – DOI: 10.1116/1.1518021.
3. **Furlan, W.D.** 3D printed diffractive terahertz lenses / W.D. Furlan, V. Ferrando, J.A. Monsoriu, P. Zagrajek, E. Czernawska, M. Szustakowski // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, Issue 8. – P. 1748-1751. – DOI: 10.1364/OL.41.001748.
 4. **Агафонов, А.Н.** Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического терагерцового излучения / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, В.А. Сойфер, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Ю.Ю. Чопорова // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 98-105.
 5. **Кныазев, В.А.** Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application / В.А. Кныазев, V.S. Cherkassky, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, M.G. Vlasenko, M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2011. – Vol. 32, Issue 10. – P. 1207-1222. – DOI: 10.1007/s10762-011-9773-x.
 6. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с. – ISBN: 5-9221-0845-4.
 7. **Агафонов, А.Н.** Кремниевая оптика для фокусировки лазерного излучения терагерцового диапазона в заданные двумерные области / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, С.Г. Вологовский, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Д.И. Цыпишка, Ю.Ю. Чопорова // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 464-470.
 8. **Комленок, М.С.** Создание линзы Френеля терагерцового диапазона с многоуровневым микрорельефом методом фемтосекундной лазерной абляции / М.С. Комленок, Б.О. Володкин, Б.А. Князев, В.В. Кононенко, Т.В. Кононенко, В.И. Конов, В.С. Павельев, В.А. Сойфер, К.Н. Тукмаков, Ю.Ю. Чопорова // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, № 10. – С. 933-936.
 9. **Minkevičius, L.** Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon / L. Minkevičius, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas, B. Voisiat, V. Janonis, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, G. Račiukaitis, G. Valušis // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42, Issue 10. – P. 1875-1878. – DOI: 10.1364/OL.42.001875.
 10. **Zeng, X.** Experimental investigation of ablation efficiency and plasma expansion during femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon / X. Zeng, X.L. Mao, R. Greif, R.E. Russo // Applied Physics A. – 2005. – Vol. 80, Issue 2. – P. 237-241. – DOI: 10.1007/s00339-004-2963-9.
 11. **Duparré, M.** Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO₂ laser beams / M. Duparré, M.A. Golub, B. Lüdge, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev, S.G. Volotovskii // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2489-2497. – DOI: 10.1364/AO.34.002489.
 12. **Pavelyev, V.S.** Fabrication of high-effective silicon diffractive optics for the terahertz range by femtosecond laser ablation / V.S. Pavelyev, M.S. Komlenok, B.O. Volodkin, В.А. Кныазев, Т.В. Кононенко, В.И. Конов, V.A. Soifer, Yu.Yu. Choporova // Physics Procedia. – 2016. – Vol. 84. – P. 170-174. – DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.030.
 13. **Her, T.H.** Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses / T.H. Her, R.J. Finlay, C. Wu, S. Deliwala, E. Mazur // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73, Issue 12. – 1673. – DOI: 10.1063/1.122241.
 14. **Sánchez, F.** Characterization of the progressive growth of columns by excimer laser irradiation of silicon / F. Sánchez, J.L. Morenza, V. Trtik // Applied Physics Letters. – 1999. – Vol. 75, Issue 21. – 3303 (5 p.). – DOI: 10.1063/1.125332.
 15. **Bonse, J.** Femtosecond laser ablation of silicon—modification thresholds and morphology / J. Bonse, S. Baudach, J. Krüger, W. Kautek, M. Lenzner // Applied Physics A. – 2002. – Vol. 74, Issue 1. – P. 19-25. – DOI: 10.1007/s003390100893.

Сведения об авторах

Тукмаков Константин Николаевич, инженер кафедры nanoинженерии, научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков. E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Комленок Максим Сергеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела светопрозрачных индуцированных поверхностных явлений Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: лазерная обработка и исследование различных углеродных и кремниевых материалов, спектроскопия и структурная модификация. E-mail: komlenok@nsc.gpi.ru.

Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой nanoинженерии Самарского университета; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: nano@ssau.ru.

Информация об авторах **Кононенко Тарас Викторович** и **Конов Виталий Иванович** см. стр.938 этого номера.

ГРНТИ: 29.33.17

Поступила в редакцию 24 сентября 2018 г. Окончательный вариант – 7 ноября 2018 г.

A CONTINUOUS-PROFILE DIFFRACTIVE FOCUSER FOR TERAHERTZ RADIATION FABRICATED BY LASER ABLATION OF SILICON

K.N. Tukmakov^{1, 2, 3}, M.S. Komlenok^{3, 4}, V.S. Pavelyev^{1, 2}, T.V. Kononenko^{3, 4}, V.I. Konov^{3, 4}

¹ Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse 34,

² IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

³ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

⁴ National Research Nuclear University, Moscow, Russia

Abstract

A method of high-frequency laser ablation using a two-coordinate beam scanner for the fabrication of a diffractive element of terahertz range with a continuous profile has been developed and successfully applied. Results of the characterization of the fabricated microrelief of a silicon focuser of a Gaussian beam into a square region are presented.

Keywords: diffractive optics, free-electron lasers, terahertz radiation, laser ablation.

Citation: Tukmakov KN, Komlenok MS, Pavelyev VS, Kononenko TV, Konov VI. A continuous-profile diffractive focuser for terahertz radiation fabricated by laser ablation of silicon. *Computer Optics* 2018; 42(6): 941-946. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-941-946.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under RFBR grant #17-32-50094. The investigation of the morphology by means of electron microscopy was supported by the RF Ministry of Education and Science within a FSRC "Crystallography and Photonics" RAS' state project. The authors are grateful to B.A. Knyazev and Yu.Yu. Choporova for help with the choice of focuser calculation parameters.

References

- [1] Kulipanov GN, Bagryanskaya EG, Chesnokov EN, Choporova YuYu, Gerasimov VV, Getmanov YaV, Kiselev SL, Knyazev BA, Peltek SE, Popik VM, Salikova TV, Scheglov MA, Seredniakov SS, Shevchenko OA, Skrinsky AN, Veber SL, Vinokurov NA. Novosibirsk free electron laser-facility description and recent experiments. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 2015; 5(5): 798-809. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
- [2] Walsby ED, Wang S, Xu J, Yuan T, Blaikie R, Durbin SM, Zhang X-C, Cumming DRS. Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves. *J Vac Sci Technol B* 2002; 20(6): 2780. DOI: 10.1116/1.1518021.
- [3] Furlan WD, Ferrando V, Monsoriu JA, Zagrajek P, Czerwinska E, Szustakowski M. 3D printed diffractive terahertz lenses. *Opt Lett* 2016; 41(8): 1748-1751. DOI: 10.1364/OL.41.001748.
- [4] Agafonov AN, Volodkin BO, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Soifer VA, Tukmakov KN, Tsygankova EV, Choporova YuYu. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2013; 49(2): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
- [5] Knyazev BA, Cherkassky VS, Choporova YuYu, Gerasimov VV, Vlasenko MG, Dem'yanenko MA, Esaev DG. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application. *J Infrared Milli Terahz Waves* 2011; 32(10): 1207-1222. DOI: 10.1007/s10762-011-9773-x.
- [6] Soifer VA, ed. *Computer design of diffractive optics*. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Limited and Woodhead Publishing Limited; 2013. ISBN: 978-1-84569-635-1.
- [7] Agafonov AN, Volodkin BO, Volotovskiy SG, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Tykmaev KN, Pavelyev VS, Tsygankova EV, Tsyppishka DI, Choporova YuYu. Silicon optics for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain [In Russian]. *Computer Optics* 2013; 37(4): 464-470.
- [8] Komlenok MS, Kononenko VV, Kononenko TV, Konov VI, Volodkin BO, Pavelyev VS, Soifer VA, Tukmakov KN, Knyazev BA, Choporova YY. Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation. *Quantum Electronics* 2015; 45(10): 933-936. DOI: 10.1070/QE2015v045n10ABEH015890.
- [9] Minkevičius L, Indrišiūnas S, Šniaukus R, Voisiat B, Janonis V, Tamošiūnas V, Kašalynas I, Račiukaitis G, Valušis G. Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon. *Opt Lett* 2017; 42(10): 1875-1878. DOI: 10.1364/OL.42.001875.
- [10] Zeng X, Mao XL, Greif R, Russo RE. Experimental investigation of ablation efficiency and plasma expansion during femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon. *Appl Phys A* 2005; 80(2): 237-241. DOI: 10.1007/s00339-004-2963-9.
- [11] Duparré M, Golub MA, Lüdge B, Pavelyev VS, Soifer VA, Uspleniev GV, Volotovskii SG. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO₂ laser beams. *Appl Opt* 1995; 34(14): 2489-2497. DOI: 10.1364/AO.34.002489.
- [12] Pavelyev VS, Komlenok MS, Volodkin BO, Knyazev BA, Kononenko TV, Konov VI, Soifer VA, Choporova YuYu. Fabrication of high-effective silicon diffractive optics for the terahertz range by femtosecond laser ablation. *Physics Procedia* 2016; 84: 170-174. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.030.
- [13] Her TH, Finlay RJ, Wu C, Deliwala S, Mazur E. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses. *Appl Phys Lett* 1998; 73(12): 1673. DOI: 10.1063/1.122241.
- [14] Sánchez F, Morenza JL, Trtik V. Characterization of the progressive growth of columns by excimer laser irradiation of silicon. *Appl Phys Lett* 1999; 75(21): 3303. DOI: 10.1063/1.125332.
- [15] Bonse J, Baudach S, Krüger J, Kautek W, Lenzner M. Femtosecond laser ablation of silicon—modification thresholds and morphology. *Appl Phys A* 2002; 74(1): 19-25. DOI: 10.1007/s003390100893.

Authors' information

Konstantin Nickolaevich Tukmakov, engineer of Nanoengineering department, researcher of REC “Nanotechnology” of Samara University. Research interests: the fabrication of micro- and nanostructures, technology focused ion beams. E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Maxim Sergeevich Komlenok, Doctor of Philosophy, researcher of Laser Induced Surface Phenomena department, Natural Sciences Center of General Physics Institute, Moscow, Russia. Research interests: laser processing and characterization of different carbon and silicon materials, spectroscopic diagnostics, and structure modification. E-mail: komlenok@nsc.gpi.ru.

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of Samara University, chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. E-mail: nano@ssau.ru.

The information about authors **Taras Viktorovich Kononenko** and **Vitaly Ivanovich Konov** you can find on page 940 of this issue.

ГРПТИ: 29.33.17

Received September 24, 2018. The final version – November 7, 2018.
