

ФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА (NOVOFEL) В СООСНЫЙ ОТРЕЗОК

Агафонов А.Н.¹, Володкин Б.О.¹, Кавеев А.К.², Качалов Д.Г.¹, Князев Б.А.^{3,4}, Кропотов Г.И.², Тукмаков К.Н.¹,
Павельев В.С.^{1,5}, Цытшица Д.И.², Чопорова Ю.Ю.^{3,4}

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ),

²ООО «ТИДЕКС»,

³Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,

⁴Новосибирский государственный университет,

⁵Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Приведены результаты исследования кремниевого бинарного дифракционного оптического элемента – фокусатора терагерцового лазерного излучения из Гауссова пучка в соосный отрезок. Характеристики дифракционного оптического элемента были исследованы в пучке новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на длине волны 141 мкм.

Ключевые слова: дифракционная оптика, лазеры на свободных электронах, терагерцовое и дальнее ИК-излучение, соосный отрезок.

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) нашли широкое применение в оптическом приборостроении ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов [1]. Применение ДОЭ позволяет создавать оптические приборы с уменьшенными массогабаритными характеристиками и широкими функциональными возможностями [1]. Известны результаты исследования кремниевых бинарных дифракционных линз и делителей пучка [2] для управления излучением мощного монохроматического пучка ТГц-лазера на свободных электронах (ЛСЭ) [3]. В [4] приведены результаты исследования дифракционного оптического элемента, фокусирующего Гауссов пучок терагерцового лазера на свободных электронах в квадратную фокальную область.

Такие приложения, как получение терагерцовых изображений (в том числе протяжённых объектов), абляция, генерация оптического разряда и другие, требуют фокусировки терагерцового излучения, часто – фокусировки с повышенной глубиной фокуса. В [1, 5, 6] приведены результаты исследования оптических элементов видимого и ИК-диапазонов, предназначенных для фокусировки исходного лазерного пучка в соосный отрезок («протяжённый фокус»).

В настоящей статье приведены результаты исследования кремниевого бинарного дифракционного фокусатора, предназначенного для фокусировки Гауссова пучка терагерцового лазера в соосный отрезок. Элемент был изготовлен с помощью реактивно-ионного травления (РИТ) поверхности пластины из высокоомного кремния с последующим нанесением антиотражающего покрытия. Исследования характеристик элемента выполнены на рабочей станции новосибирского ЛСЭ (NOVOFEL) [3], получены первые результаты.

1. Синтез ДОЭ для фокусировки лазерного излучения в соосный отрезок

Для производства ДОЭ терагерцового диапазона, работающих с высокоэнергетическими пучками (например, с лазерами на свободных электронах), в ка-

честве исходного материала необходимо использовать нелегированный высокоомный кремний [2]. В данной работе были использованы подложки из кремния HRFZ-Si [7] с двухсторонней полировкой оптического качества диаметром 38 мм и толщиной 1 мм. Получение бинарного микрорельефа высотой 29,1 мкм на поверхности подложки производилось с помощью реактивно-ионного травления кремния (РИТ) [8]. Была использована технология формирования бинарного микрорельефа терагерцового диапазона на поверхности кремниевой пластины, ранее использованная в [2, 4] для изготовления бинарных дифракционных линз и делителей пучка терагерцового диапазона. Для уменьшения френелевских потерь на отражение на элемент наносилось двустороннее антиотражающее покрытие из парилена С. Парилена С в качестве антиотражающего покрытия ранее был использован в работах [2, 4, 9, 10]. Толщина слоя парилена С с каждой стороны элемента составляла около 21 мкм.

Расчёт бинарного микрорельефа производился с использованием модификации стохастической процедуры [6], построенной на основе использования генетического алгоритма.

Для расчёта использовались следующие параметры фокусатора: диаметр апертуры – 30 мм, рабочая длина волны – 141 мкм, расстояние от плоскости установки элемента до начала соосного светового отрезка – 110 мм, использованное в расчётах значение радиуса Гауссова освещающего пучка – 9 мм, число отсчётов фазовой функции вдоль радиуса – 200, длина соосного светового отрезка – 30 мм.

Расчётная высота микрорельефа радиально-симметричного ДОЭ определяется формулой [1]

$$h(r) = \lambda \varphi(r) / 2\pi(n-1), \quad (1)$$

где n – показатель преломления материала подложки, $\varphi(r)$ – фазовая функция ДОЭ [1]. Рассчитанная фазовая функция $\varphi(r)$ бинарного (двухуровневого) фокусатора в соосный отрезок приведена на рис. 1.

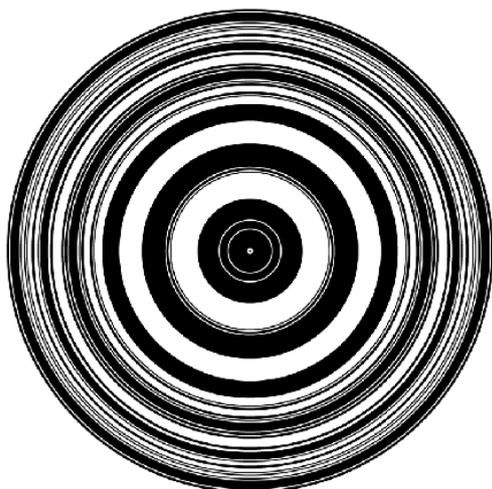


Рис. 1. Фазовая функция рассчитанного фокусатора (белый цвет соответствует значению фазы π , чёрный цвет – 0)

Значение показателя преломления кремния составляет $n=3,42$, таким образом, расчётная высота бинарного рельефа для длины волны 141 мкм составляет $h=29,1$ мкм. Расчётное значение энергетической эффективности фокусатора незначительно варьировалось в различных сечениях светового соосного отрезка и в среднем составляло $e=19,27\%$.

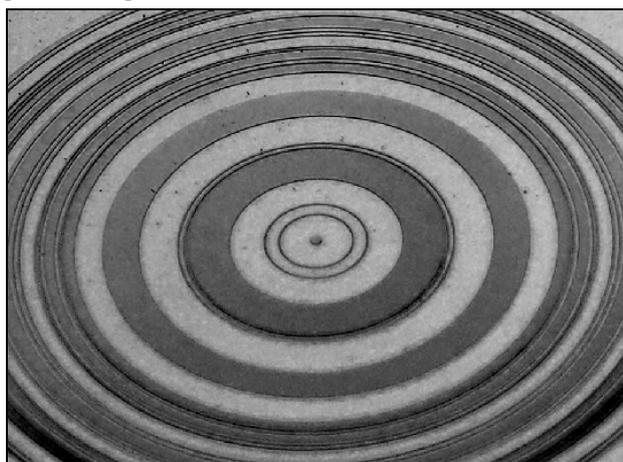


Рис. 2. Фотография изготовленного элемента

2. Контроль геометрических параметров микрорельефа

Контроль геометрических параметров получаемых ДОЭ осуществлялся методами интерферометрии белого света с помощью интерферометра WLI-DMR (производство Института Фраунгофера, г. Йена, Германия) и средствами растровой электронной микроскопии (рис. 3) с помощью электронного микроскопа Quanta-200 (FEI). Интерферометрия использовалась как экспресс-средство контроля глубины протравки и качества дна. Отклонение высоты сформированного микрорельефа от расчётной не превышало 10%.

Растровая электронная микроскопия использовалась для оценки качества травления стенок и дна, а также для контроля геометрических размеров получаемых элементов микрорельефа.

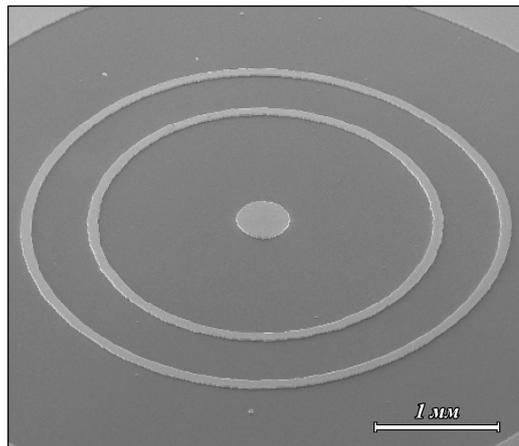


Рис. 3. Электронная фотография центрального фрагмента изготовленного микрорельефа

3. Исследование элемента с помощью новосибирского лазера на свободных электронах

Оптические характеристики изготовленного ДОЭ были исследованы на одной из рабочих станций новосибирского ЛСЭ. Оптическая схема приведена на рис. 4. Лазер генерировал монохроматическое излучение с длительностью импульса 100 пс при частоте повторения 5,6 МГц. Лазерный пучок имел Гауссово распределение интенсивности. Средняя мощность излучения в экспериментах составляла десятки ватт. При выполнении экспериментов минимальная длина волны генерации лазера была ограничена величиной $\lambda=141$ мкм, на которой и были проведены все эксперименты. Значение модового радиуса σ Гауссова освещающего пучка с распределением интенсивности $I(x,y)=C \exp(-2(x^2+y^2)/\sigma^2)$ в эксперименте отличалось от расчётного значения и составляло более 11 мм.

Прошедшее сквозь элемент излучение регистрировалось при помощи матричного микроболометрического приёмника размером 320×240 элементов [11].

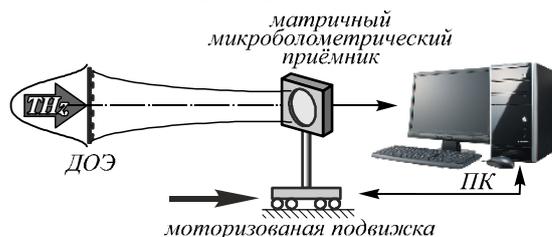


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента на ЛСЭ

4. Результаты экспериментов

Результаты измерения распределения интенсивности ТГц-излучения в плоскостях, отстоящих на разное расстояние от фокусатора, приведены на рис. 5. Отметим, что сфокусированный пучок сохраняет близкое к Гауссовому распределение интенсивности.

В [6] отмечалось, что элементы для формирования соосного отрезка из освещающего Гауссова пучка, рассчитанные итерационной процедурой [6], обладают оптической силой. Этим и объясняется «самовоспроизведение» Гауссова пучка при распространении вдоль отрезка фокусировки (рис. 5).

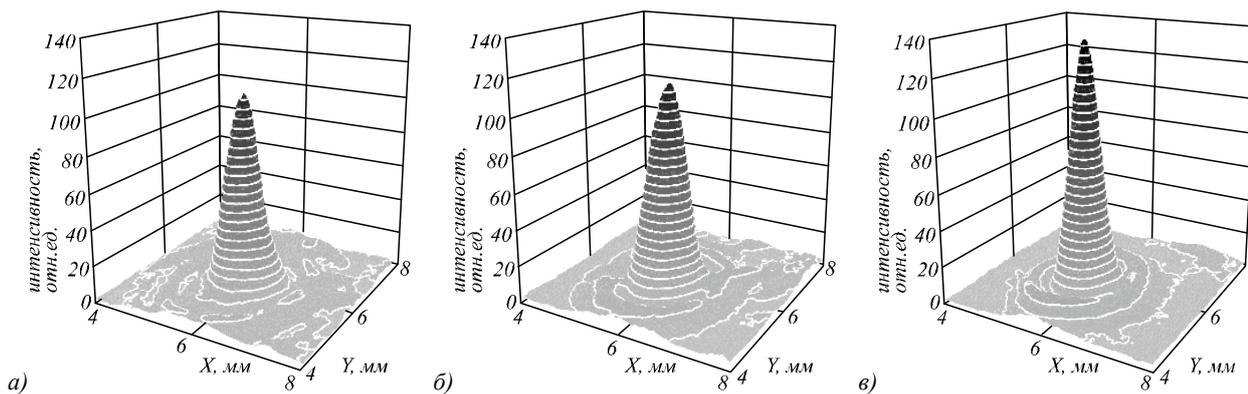


Рис. 5. Распределение интенсивности ТГц-излучения в плоскостях, отстоящих на различное расстояние z от плоскости установки элемента z = 110 мм (а), z = 125 мм (б), z = 140 мм (в)

Измерявшиеся в ходе оптического эксперимента в разных плоскостях значения энергетической эффективности находились в хорошем соответствии с расчётным значением (табл. 1).

Табл. 1. Измеренная энергетическая эффективность изготовленного фокусатора

Расстояние от плоскости ДООЭ до плоскости регистрации, мм	110	125	140
Энергетическая эффективность e, %	18,6	18,2	17,4

На рис. 6 приведены графики распределения интенсивности вдоль оптической оси, полученные в ходе оптического эксперимента и в результате численного моделирования. Применение изготовленного оптического элемента позволило сформировать соосное распределение интенсивности на заданном осевом отрезке 110 мм ÷ 140 мм (рис. 6).

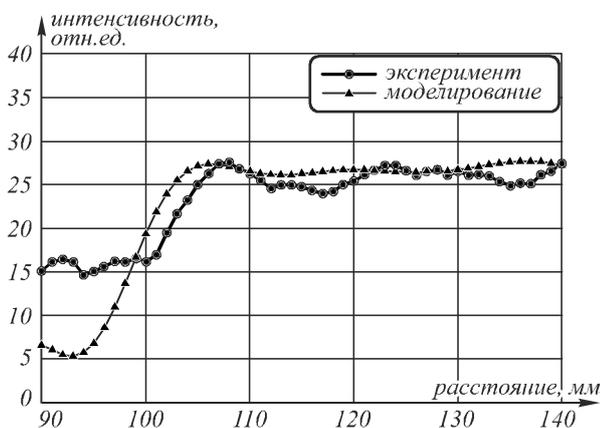


Рис. 6. Распределение интенсивности вдоль оптической оси, сформированное изготовленным элементом

В [12] показано, что при фокусировке Гауссова пучка линзой ширина пучка $\omega = \sigma / \sqrt{2}$ при удалении от точки максимальной концентрации $z_0 = f$, где ширина распределения равна ω_0 , меняется по закону $\omega^2 = \omega_0^2 + (z/k\omega_0)^2$, где k – волновое число.

Нетрудно показать, что для линзы с фокусным расстоянием 125 мм (что соответствует середине формируемого соосного отрезка) и параметров используемого в эксперименте освещающего пучка интенсивность на оптической оси на расстоянии 15 мм от точки фокуси-

ровки (что соответствует полудлине формируемого отрезка) упадёт более чем в 7 раз.

Сравнение результатов, приведённых на рис. 6, с оценкой глубины фокуса линзы с фокусным расстоянием 125 мм показывает, что применение созданного элемента позволило значительно увеличить глубину фокуса, что важно, например, при создании сканирующих систем терагерцового диапазона. Отметим также хорошую устойчивость работы элемента к отклонению модового параметра освещающего пучка от расчётного значения.

Заключение

Эксперименты показали возможность применения бинарных дифракционных элементов для формирования соосного распределения интенсивности излучения терагерцового диапазона.

Совершенствование технологии формирования кремниевого микрорельефа, в частности, увеличение числа уровней квантования микрорельефа позволит в перспективе повысить энергетическую эффективность кремниевых элементов, предназначенных для фокусировки пучков терагерцового излучения в соосные фокальные области.

Благодарности

Данная работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013–2020 г.г. и Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект № 1879, грантом РФФИ 13-02-97007 и выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Сибирский Центр синхротронного и терагерцового излучения (ЦКП СЦСТИ).

Литература

1. Головашкин, Д.Л. 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.
2. 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.
- Кныазев, В.А.** Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / В.А. Кныазев, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
 - 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, К.Н. Тукмаков, В.С. Павельев, Е.В. Цыганкова, Д.И. Цыпишка, Ю.Ю. Чопорова // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 464-470. – ISSN 0134-2452.
 - Голуб, М.А.** Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // *Письма в ЖТФ*. – 1981. – Т. 7, Вып. 10. – С. 618-623.
 - Kachalov, D.G.** Application of the direct search in solving a problem of forming longitudinal distribution of intensity / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58(1). – P. 69-76.
 - Silicon [electrical Resource]. – <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>.
 - Ayón, A.A.** Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher / A.A. Ayón, R. Braff, C.C. Lin, H.H. Sawin, M.A. Schmidt // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1999. – Vol. 146, Issue 1. – P. 339-349.
 - Gatesman, A.J.** An antireflection coating for silicon optics at terahertz frequencies / A.J. Gatesman // *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE*. – 2000. – Vol. 10. – P. 264-266.
 - Hübers, H.W.** Parylene antireflection coating of a quasi-optical hot-electron-bolometric mixer at terahertz frequencies / H.W. Hübers, J. Schubert, A. Krabbe, M. Birk, G. Wagner, A. Semenov, G. Gol'tsman, B. Voronov, E. Gershenson // *Infrared Physics & Technology*. – 2001. – Vol. 42. – P. 41-47.
 - Dem'yanenko, M.A.** Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser / M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – P. 131116.
 - Карлов, Н.В.** Лекции по квантовой электронике / Н.В. Карлов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
 - Agafonov, A.N.** Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation / A.N. Agafonov, B.O. Volodkin, A.K. Kaveev, B.A. Knyazev, G.I. Kropotov, V.S. Pavel'ev, V.A. Soifer, K.N. Tukmakov, E.V. Tsygankova, Yu.Yu. Choporova // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2013. – Vol. 49, Issue 2 – P. 189-195.
 - Кныазев, В.А.** Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / В.А. Кныазев, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
 - Агафонов, А.Н.** Silicon optics for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain / A.N. Agafonov, B.O. Volodkin, S.G. Volotovskiy, A.K. Kaveev, B.A. Knyazev, G.I. Kropotov, K.N. Tykmaikov, V.S. Pavelyev, E.V. Tsygankova, D.I. Tsyppishka, Yu.Yu. Choporova // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37(4). – P. 464-470.
 - Golub, M.A.** Focusing of coherent light onto a desired spatial domain using computer-generated holograms / M.A. Golub, S.V. Karpeev, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Soviet Technical Physics Letters*. – 1981. – Vol. 7(10). – P. 618-623.
 - Kachalov, D.G.** Application of the direct search in solving a problem of forming longitudinal distribution of intensity / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58(1). – P. 69-76.
 - Silicon [electrical Resource]. – <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>.
 - Ayón, A.A.** Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher / A.A. Ayón, R. Braff, C.C. Lin, H.H. Sawin, M.A. Schmidt // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1999. – Vol. 146, Issue 1. – P. 339-349.
 - Gatesman, A.J.** An antireflection coating for silicon optics at terahertz frequencies / A.J. Gatesman // *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE*. – 2000. – Vol. 10. – P. 264-266.
 - Hübers, H.W.** Parylene antireflection coating of a quasi-optical hot-electron-bolometric mixer at terahertz frequencies / H.W. Hübers, J. Schubert, A. Krabbe, M. Birk, G. Wagner, A. Semenov, G. Gol'tsman, B. Voronov, E. Gershenson // *Infrared Physics & Technology*. – 2001. – Vol. 42. – P. 41-47.
 - Dem'yanenko, M.A.** Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser / M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – P. 131116.
 - Карлов, Н.В.** Lectures on quantum electronics / N.V. Karlov. – Moscow: "Mir" Publishers; Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1993.

References

- Soifer, V.A.** Computer design of diffractive optics / V.A. Soifer. – Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.

BINARY DOE WITH ELONGATED FOCAL DEPTH TO FOCUS TERAHERTZ FREE ELECTRON LASER RADIATION (NOVOFEL)

A.N. Agafonov¹, B.O. Volodkin¹, A.K. Kaveev², D.G. Kachalov¹, B.A. Knyazev^{3,4}, G.I. Kropotov², K.N. Tukmakov¹, V.S. Pavelyev^{1,3}, D.I. Tsyppishka², Yu.Yu. Choporova^{3,4}

¹ Samara State Aerospace University,

² Tydex LLC, Saint-Petersburg,

³ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,

⁴ Novosibirsk State University,

⁵ Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences

Abstract

A binary silicon diffractive optical element (DOE) focusing laser radiation onto an axial segment (or a DOE with elongated focal depth) for the terahertz spectral range has been designed and characterized using terahertz radiation of the Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL).

Keywords: diffractive optics, free electron lasers, terahertz and far infrared radiation, axial light segment.

Сведения об авторах

Агафонов Андрей Николаевич, к.т.н., ассистент кафедры наноинженерии, научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технологии микро- и наноэлектроники и дифракционной микрооптики.

E-mail: andr_agafonov@mail.ru.

Andrey Nikolaevich Agafonov, PhD in Technical Sciences, assistant of Nanoengineering department, researcher of REC “Nanotechnology” of Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). Areas of research: technology of micro- and nanoelectronics and diffractive microoptics.

Володкин Борис Олегович, инженер кафедры наноинженерии, заместитель директора НОЦ нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технологии микро- и наноструктур, сканирующая зондовая микроскопия, полимерные системы.

E-mail: boris-volodkin@yandex.ru.

Boris Olegovich Volodkin, engineer of Nanoengineering department, vice-director of REC “Nanotechnology” of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University). Areas of research: technology of micro- and nanostructures, scanning probe microscopy, polymer systems.

Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт 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.

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov, 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.

Тукмаков Константин Николаевич, инженер кафедры наноинженерии, научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков.

E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Konstantin Nickolaevich Tukmakov, engineer of Nanoengineering department, researcher of REC “Nanotechnology” of Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). Research interests: the fabrication of micro- and nanostructures, technology focused ion beams.

Кавеев Андрей Камильевич, к.ф.-м.н., начальник сектора НИОКР компании «Тидекс». Область научных интересов: терагерцовая фотоника и оптика, методы генерации, преобразования и детектирования ТГц-излучения.

E-mail: andreykaveev@tydex.ru.

Andrey Kamilevich Kaveev, PhD in Physics, head of R&D section, “Tydex”-company. Research interests: terahertz photonics and optics, methods of generation, transformation and detection of THz-radiation.

Качалов Денис Георгиевич, инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. научно-образовательного центра нанотехнологий Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, методы стохастической оптимизации.

E-mail: kachalov@ssau.ru.

Denis Georgievich Kachalov, engineer of Nanoengineering department and researcher of Research and Educational Center “Nanotechnology” of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, methods of stochastic optimization.

Князев Борис Александрович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика, спектроскопия, лазеры, терагерцовое излучение, физика плазмы, мощные пучки заряженных частиц.

E-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru.

Boris Aleksandrovich Knyazev, Doctor in Physics and Math, principal scientist at Budker Institute of Nuclear Physics and head of Applied Electrodynamics laboratory at Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, lasers, terahertz radiation, plasma physics, high-power electron and ion beams.

Кропотов Григорий Иванович, кандидат физико-математических наук, генеральный директор компании «Тидекс», производящей оптику для науки и промышленности, в том числе терагерцовую. Область научных интересов: исследования в области терагерцовой лазерной магнитной спектроскопии и терагерцовой Фурье-спектроскопии полупроводников.

E-mail: grigorykropotov@tydex.ru.

Grigoriy Ivanovich Kropotov, PhD in Physics, General manager of Tydex Co, manufacturer of various scientific and industry-oriented optics, including terahertz optics. Research interests: research in terahertz laser magnetic spectroscopy and terahertz Fourier spectroscopy of semiconductors.

Чопорова Юлия Юрьевна, м.н.с. Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, м.н.с. научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика, спектроскопия, голография, терагерцовое излучение.

E-mail: yu.yu.choporova@inp.nsk.su.

Yulia Yurevna Choporova, junior researcher of Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, junior researcher of Applied Electrodynamics laboratory at Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, holography, terahertz radiation.

Поступила в редакцию 30 сентября 2014 г.