

КРЕМНИЕВАЯ ОПТИКА ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА В ЗАДАННЫЕ ДВУМЕРНЫЕ ОБЛАСТИ

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

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

²Институт систем обработки изображений РАН,

³ЗАО «ТИДЕКС»,

⁴Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,

⁵Новосибирский государственный университет

Аннотация

Приведены описание технологии изготовления и первые результаты исследования кремниевого бинарного дифракционного оптического элемента – фокусатора терагерцового лазерного излучения из Гауссова пучка в квадрат (диаметр апертуры элемента – 30 мм). Характеристики дифракционного оптического элемента были исследованы в пучке новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на длине волны 141 мкм.

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

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) нашли широкое применение в лазерных технологических установках и оптических приборах ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов [1]. Применение ДОЭ позволяет создавать оптические приборы с уменьшенными массогабаритными характеристиками и широкими функциональными возможностями. Вследствие более высокого (по сравнению с видимым диапазоном) поглощения материалов, прозрачных в терагерцовом (ТГц) диапазоне, использование ДОЭ в ТГц-диапазоне предпочтительнее, чем использование дифракционных элементов. ДОЭ практически не имеют альтернативы в случае управления излучением мощного монохроматического пучка ТГц-лазера на свободных электронах (ЛСЭ) [2]. Такие приложения, как ТГц-голография [3], интерферометрия и поляриметрия требуют решения задачи деления исходного пучка на несколько пространственно-разнесённых пучков с заданным распределением энергии между ними.

Другие приложения: получение терагерцовых изображений, мягкая абляция, генерация оптического разряда и многие другие – требуют фокусировки терагерцового излучения. Известны результаты исследования кремниевых бинарных дифракционных линз [4, 5] и делителей пучка [4] для управления лазерным терагерцовым излучением.

В настоящей статье приведены результаты исследования кремниевого бинарного дифракционного фокусатора, предназначенного для фокусировки Гауссова пучка терагерцового лазера в квадрат с равномерным распределением интенсивности. Известны работы [1, 6, 7], посвящённые созданию ДОЭ для фокусировки Гауссова пучка в прямоугольник. Актуальность создания таких элементов для лазеров ИК-диапазона объясняется как необходимостью формирования равномерного распределения интенсивности на обрабатываемой поверхности при решении различных задач лазерных технологий, так и требованием однородного облучения объектов во многих экспериментах, на-

пример, биологических. В качестве материала подложки пропускающих элементов среднего инфракрасного диапазона обычно используют селенид цинка или поликристаллические алмазные плёнки [6]. Формирование равномерного распределения интенсивности в терагерцовом диапазоне позволит существенно повысить эффективность применения терагерцовой абляции, а также строить сканирующие системы нового поколения, избавленные от необходимости проведения поточечного сканирования образца.

В настоящей работе 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 [2], получены первые результаты.

1. Синтез ДОЭ для фокусировки лазерного излучения в квадрат

Для производства ДОЭ терагерцового диапазона, работающих с высокоэнергетическими пучками (например, лазерами на свободных электронах), в качестве исходного материала необходимо использовать нелегированный высокоомный кремний. В данной работе были использованы подложки из кремния HRFZ-Si [8] 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). Для уменьшения френелевских потерь на отражение на элемент наносилось двустороннее антиотражающее покрытие из парилена *C* (полипарацисиллена). Парилена *C* в качестве антиотражающего покрытия ранее был использован в работах [9, 10]. Толщина слоя парилена *C* с каждой стороны элемента составляла около 21 микрона.

Расчёт бинарного микрорельефа производился с использованием стохастической процедуры, постро-

енной на основе использования генетического алгоритма. Применение генетического алгоритма для расчёта ДОЭ с малым числом уровней квантования в задаче формирования равномерного распределения интенсивности из Гауссова пучка рассматривалось, например, в [1].

Для расчёта использовались следующие параметры фокусатора: апертура – $30 \times 30 \text{ мм}^2$, рабочая длина волны – 141 мкм, фокусное расстояние (элемент рассчитан на работу без внешней линзы) – 368 мм, радиус Гауссова освещающего пучка – 9 мм, число отсчётов фазовой функции – 120×120 , размер квадратной фокальной области – $8,6 \times 8,6 \text{ мм}^2$.

Расчитанная фазовая функция фокусатора в квадрат приведена на рис. 1.



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

Расчётная высота бинарного микрорельефа определялась по формуле [1]

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

где n – показатель преломления кремния ($n=3,42$), и составляла $h=29,1 \text{ мкм}$. Расчётное значение энергетической эффективности фокусатора составило $e=55,6\%$.

2. Технология формирования дифракционного микрорельефа

Отмывка кремниевых пластин производилась в ультразвуковой ванне с раствором моющего средства при температуре 80°C в течение 30 минут. Промывка в бидистиллированной воде производилась перед каждой сменой раствора, в который помещалась пластина. Затем пластины помещались в раствор $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ 2:1 на 10 минут и далее в слабый раствор HF: H_2O 1:20 на 10 секунд для удаления естественного слоя оксида на поверхностях пластины. Сушка пластин производилась в центрифуге при 3600 об./мин. в течение 60 секунд.

Для получения маскирующего покрытия была выполнена металлизация кремниевой пластины слоем меди толщиной 200 нм с последующей оптической литографией. Требование применения именно металлических масок продиктовано их высокой плазмостойкостью и селективностью по кремнию, что позволяет выполнить относительно глубокое РИТ кремния для получения требуемой высоты микрорельефа. Нанесение металлического покрытия выполнялось с помощью магнетронного распыления на установке «ЭТНА-100-МТ» (НТ-МТД, Россия) при комнатной температуре подложки в атмосфере аргона с давлением 1,2 Торр при ионном ассистировании.

Медная маска продемонстрировала селективность в процессе РИТ кремния более 1:300. Но при этом

медная плёнка обладает низкой адгезией к кремнию, поэтому перед нанесением медного покрытия был нанесён тонкий адгезионный подслои хрома толщиной 5 нм. Для получения топологического рисунка в медном слое применялось жидкостное травление через фоторезистивную маску в 0,1% растворе хлорного железа (FeCl_3). После травления медной плёнки производилось удаление фоторезистивной маски концентрированным раствором щёлочи. Для травления подслоя хрома через медную маску был использован раствор $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]: \text{NaOH} : \text{H}_2\text{O}$ 1:3:16.

Сразу после нанесения металлического покрытия производилось нанесение слоя фоторезиста ФП-4-04мА. Это осуществлялось центрифугированием при 3600 об./мин. в течение 60 секунд при комнатной температуре подложки. Сушка и контроль толщины полученного фотослоя производились по ТУ 2378-011-29135749-2010. Экспонирование фотослоя производилось через фотошаблон излучением от лампы ДКБу-9 (максимум излучения – 253 нм, общая мощность излучения – 2,4 Вт) в течение 6 минут. Проявление рисунка осуществлялось в 0,5% растворе NaOH в течение 2 минут.

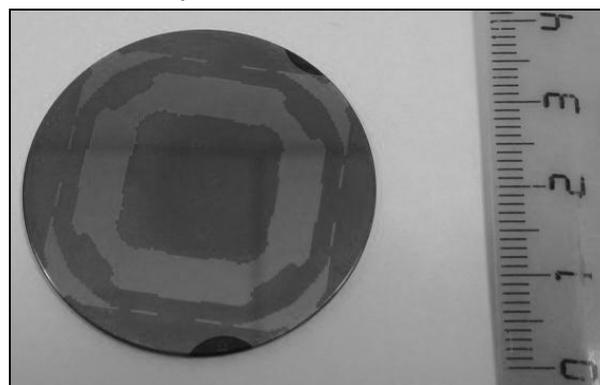


Рис. 2. Фотография кремниевой подложки с защитной маской

Подготовленная таким образом кремниевая пластина с медной маской (рис. 2) была подвергнута РИТ, которое выполнялось на установке «ЭТНА-100-ПТ» (НТ-МТД, Россия). Для получения заданных рабочих характеристик ДОЭ необходимо обеспечить угол отклонения стенок от вертикали не более 10° , поэтому был использован Bosch-процесс в индуктивно-связанной конфигурации источника плазмы (ICP-RIE) [11] в атмосфере C_4F_8 (стадия пассивации) и SF_6/Ar (стадия травления). Особенностью данного процесса является намеренное подавление стадии травления вследствие дисбаланса скорости пассивации и скорости травления: малая открытая площадь кремния приводит к значительному увеличению скорости травления (в том числе боковой составляющей), тогда как скорость роста и ограничение толщины пассивационного слоя остаются неизменными. Подавление стадии травления производилось не уменьшением времени травления (что выгоднее с экономической точки зрения), а путём добавки аргона на стадии травления, что привело к значительному снижению шероховатости стенок и особенно дна. Давление в

реакторе было около 0,1 мБар и зависело от стадии цикла травления, откачка реактора осуществлялась турбомолекулярным насосом, что обеспечивало быстрое обновление реакционной атмосферы. Расход C_4F_8 был на уровне 85 л/час (приводится величина расхода, учитывающая тип газа), расход SF_6/Ar – на уровне 10/70 л/час. Мощность ИСР-источника индуктора – 300 Вт, ускоряющий источник работал только на стадии травления и только в режиме регуляции автосмещения потенциала подложки (constant DC-Bias) 200 В, при этом его мощность не превышала 15 Вт. Длительность циклов подбиралась для обеспечения вертикальности стенок и составила 10 секунд для фазы пассивации и 7 секунд для фазы травления. Глубина травления за один цикл при этом составляла 100 нм. Общая глубина травления задавалась количеством циклов. После выполнения циклического травления выполнялась кратковременная «зачистка» поверхности в атмосфере SF_6 в изотропном режиме травления.

3. Контроль геометрических параметров микрорельефа

Контроль геометрических параметров получаемых ДОЭ осуществлялся методами интерферометрии белого света (рис. 3) с помощью интерферометра WLI-DMR (производство Института Фраунгофера, г. Йена, Германия) и средствами растровой электронной микроскопии (рис. 4) с помощью электронного микроскопа FEI Quanta-200. Интерферометрия использовалась как экспресс-средство контроля глубины протрава и качества дна. Контроль методом растровой электронной микроскопии использовался для оценки качества стенок, дна и определения геометрических размеров получаемых элементов микрорельефа.

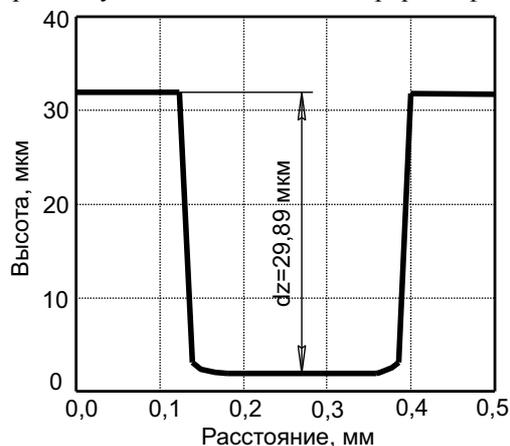


Рис. 3. Профилограмма изготовленного микрорельефа (стрелкой показана высота)

4. 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. 5. Лазер генерировал монохроматическое излучение с длительностью импульса 100 пс при частоте повторения 5,6 МГц. Лазерный пучок имел гауссов-

ское 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. Прошедшее сквозь элемент излучение регистрировалось при помощи матричного микроболометрического приёмника размером 320×240 элементов (физический размер $16,36 \times 12,24$ мм) [12].

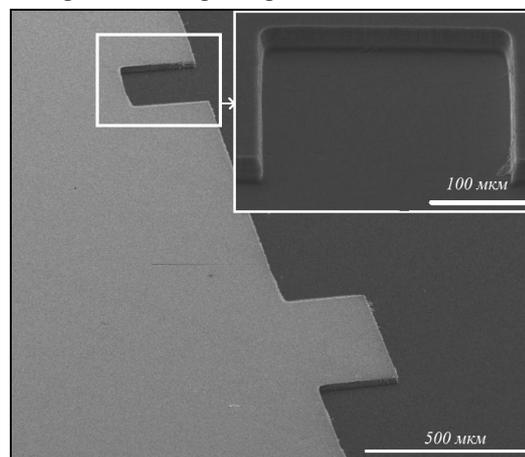


Рис. 4. Электронная фотография микрорельефа

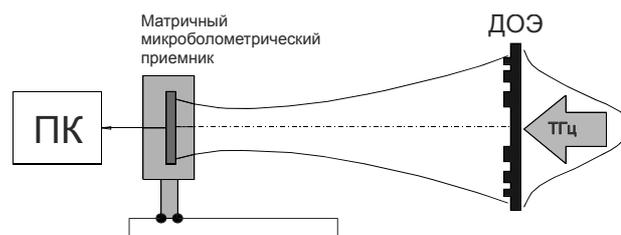


Рис. 5. Оптическая схема эксперимента на ЛСЭ

5. Результаты экспериментов

Результаты измерения распределения интенсивности ТГц-излучения в фокальной плоскости фокусатора в квадрат представлены на рис. 6. Наблюдаемый в эксперименте «провал» в центре квадрата образуется вследствие того, что элемент был рассчитан для модового радиуса, не соответствующего радиусу освещающего пучка. В экспериментах использовался пучок ТГц-излучения с модовым радиусом более 11 мм, вместо расчётного 9 мм (результат численного моделирования для расчётного значения модового радиуса приведён на рис. 7а). Численное моделирование взаимодействия пучка с модовым радиусом 11 мм с фокусатором, рассчитанным для пучка с радиусом 9 мм, представлено на рис. 7б).

Результат эксперимента (рис. 6) находится в хорошем соответствии с результатом численного моделирования (рис. 7б). Таким образом, применение пучка с расчётными параметрами позволит получить результат, соответствующий рис. 7а.

Заключение

Эксперименты показали возможность применения технологий компьютерной дифракционной оптики для создания дифракционных оптических элементов

терагерцового диапазона, формирующих заданное двумерное распределение интенсивности – *фокусаторов терагерцового диапазона*.

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

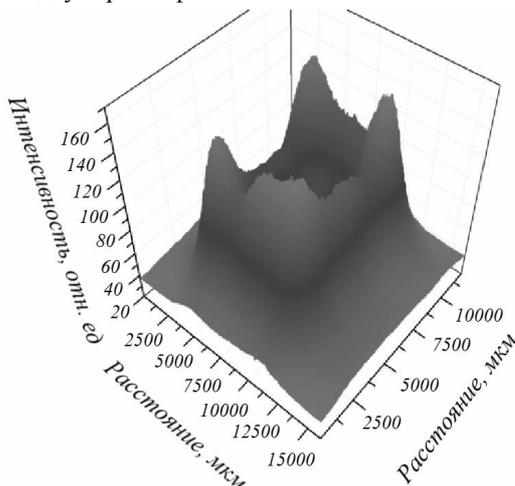


Рис. 6. Распределение интенсивности ТГц-излучения в фокальной плоскости элемента

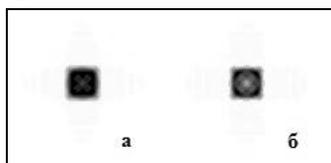


Рис. 7. Результаты численного моделирования распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости: а) рассчитанное распределение интенсивности для пучка радиусом 9 мм, б) рассчитанное распределение интенсивности для пучка радиусом 11 мм

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и гранта РФФИ 13-02-97007, с использованием оборудования 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. Knyazev, V. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / V.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // Measur. Sci. Techn. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
3. Чопорова, Ю.Ю. Запись и восстановление голограмм амплитудных объектов в терагерцовом диапазоне / Ю.Ю. Чопорова, М. Г. Власенко, В. В. Герасимов, Т. Н. Иргалин, Б. А. Князев, В. С. Черкасский // Радиоп физика. – 2011. – Т.54, №8-9. – С. 649-655.
4. Агафонов, А.Н. Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического тера-

герцового 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. Агафонов, А.Н. Дифракционные линзы для мощных пучков терагерцового излучения / А. Н. Агафонов, М. Г. Власенко, Б. О. Володкин, В. В. Герасимов, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Г. И. Кропотов, В. С. Павельев, И. Г. Пальчикова, В. А. Сойфер, М. Ф. Ступак, К. Н. Тукмаков, Е. В. Цыганкова, Ю. Ю. Чопорова // Известия РАН, сер. физическая. – 2013. – Т.77, №9. – С. 1360-1362.
6. Pavelyev, V.S. Diamond diffractive optical elements for infrared laser beam control / V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, D.L. Golovashkin, V.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, M. Duparré, B. Luedge // Proceedings SPIE. – 2004. – Vol. 5456. – P. 209-219.
7. Doskolovich, L.L. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1996. – Vol. 43, N 7. – P. 1423-1433.
8. <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>
9. 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.
10. Hübers, H.W. Parylene antireflection coating of a quasioptical 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.
11. 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, N 1. – P. 339-349.
12. 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 // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92, 131116.

References

1. Soifer, V.A. Computer design of diffractive optics/ V.A. Soifer – Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.
2. Knyazev, V. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / V.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // Measur. Sci. Techn. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
3. Choporova, Yu.Yu. Recording and reconstruction of in-line holograms of amplitude objects in the terahertz frequency range using a free electron laser / Yu. Yu. Choporova, M. G. Vlasenko, V. V. Gerasimov, T. N. Irgalin, B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2012. – Vol. 54, Issue 8-9 – P. 585-590.
4. 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
5. Agafonov, A.N. Diffractive lenses for high-power terahertz radiation beams / A.N. Agafonov, M.G. Vlasenko, B.O. Volodkin, V.V. Gerasimov, A.K. Kaveev, B.A. Knyazev, G.I. Kropotov, V.S. Pavelyev, I.G. Palchikova, V.A. Soyfer, M.F. Stupak, K.N. Tukmakov, E.V. Tsygankova, Yu. Yu.

- Choporova // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2013. – Vol. 77, Issue 9. – P. 1164-1166.
6. **Pavelyev, V.S.** Diamond diffractive optical elements for infrared laser beam control / V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, D.L. Golovashkin, V.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, M. Duparré, B. Luedge // Proceedings SPIE – 2004. – Vol. 5456. – P. 209-219.
 7. **Doskolovich, L.L.** A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1996. – Vol. 43, N 7. – P. 1423-1433.
 8. <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>
 9. **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.
 10. **Hübbers, H.W.** Parylene antireflection coating of a quasi-optical hot-electron-bolometric mixer at terahertz frequencies / H.W. Hübbers, J. Schubert, A. Krabbe, M. Birk, G. Wagner, A. Semenov, G. Gol'tsman, B. Voronov, E. Ger-shenzon // Infrared Physics & Technology – 2001. – Vol. 42. – P. 41-47.
 11. **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, N 1. – P. 339-349.
 12. **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 // Appl. Phys. Lett. – 2008 – Vol. 92. 131116.

SILICON OPTICS FOR FOCUSING OF TERAHERTZ LASER RADIATION IN A GIVEN TWO-DIMENSIONAL DOMAIN

A.N. Agafonov¹, B.O. Volodkin¹, S.G. Volotovskiy^{1,2}, A.K. Kaveev³, B.A. Knyazev^{4,5}, G.I. Kropotov³,
K.N. Tykmaev¹, V.S. Pavelyev^{1,2}, E.V. Tsygankova³, D.I. Tsyppishka³, Yu.Yu. Choporova^{4,5}

¹ Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University),

² Image Processing Systems Institute of the RAS,

³ "Tydex",

⁴ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,

⁵ Novosibirsk State University

Abstract

Binary silicon-based diffractive optical element (DOE) - Gaussian-to-Square focuser (diameter of aperture is 30 mm) for the terahertz spectral range has been designed and characterized using terahertz radiation of the Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) at the wavelength of 141 μm . The preliminary experiments have demonstrated feasibility of application of binary silicon DOE for focusing of terahertz radiation into pre-given focal domain.

Key words: diffractive optical element, free electron laser, terahertz radiation.

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-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.



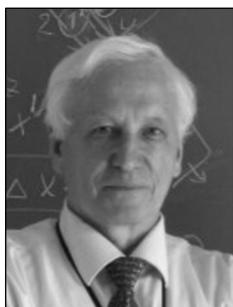
Волотовский Сергей Геннадьевич, 1959 года рождения, в 1984 году окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва (КуАИ) по специальности «Прикладная математика», работает ведущим программистом в Учреждении Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: разработка программного обеспечения расчёта и моделирования работы элементов дифракционной оптики. E-mail: sv@smr.ru.

Sergey Gennadjevich Volotovskiy, (b. 1959) graduate from Kuibishev Aviation Institute named after academician S.P. Korolyov (KuAI) on a specialty “Applied mathematics”, works as the leading programmer in the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: software design, modeling of systems with diffractive optical elements.

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.



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 Maths, principal scientist at Budker Institute of Nuclear Physics and Head of Laboratory of Applied Electrodynamics 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.



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.

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 the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov, chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research inter-



ests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures.



Цыганкова Екатерина Владимировна, магистр физики, инженер по продажам компании «Тидекс».

E-mail: ekaterinatsygankova@tydex.ru.

Ekaterina Vladimirovna Tsygankova, Master Degree in Physics, sales manager of “Tydex” Co.

Цыпишка Дмитрий Иванович, кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора компании «Тидекс» по производству приборов.

E-mail: dmitrytsypishka@tydex.ru.

Dmitry Ivanovich Tsypishka, PhD in Physics, deputy general manager of “Tydex” Co.



Чопорова Юлия Юрьевна, аспирантка 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, PhD student at Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Junior Researcher of Laboratory of Applied Electrodynamics at Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, holography, terahertz radiation.

Поступила в редакцию 27 сентября 2013 г.