

УДК 681.7 : 535.4

ЭЛЕМЕНТЫ СИЛОВОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОВЕРХНОСТЬЮ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ

© А. Н. Агафонов^{1,2}, Б. А. Князев^{3,4}, В. С. Павельев^{1,2},
Э. И. Ахметова¹, В. И. Платонов¹

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

²Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и
фотоника» РАН,

443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

⁴Новосибирский государственный университет,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: agafonov.ssau@yandex.ru

С помощью технологии микрофрезерования созданы и экспериментально исследованы силовые отражающие оптические элементы терагерцового диапазона с поверхностями свободной формы. Результаты экспериментального исследования находятся в хорошем соответствии с теоретическими оценками. Показано, что использованная в работе методика позволяет создавать фокусирующие отражающие элементы терагерцового диапазона с энергетической эффективностью свыше 94 %.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, оптические элементы свободной формы, триангуляция, фрезерование, G-код.

DOI: 10.15372/AUT20190206

Введение. Появление новых источников терагерцового излучения, например лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) [1], требует развития и совершенствования соответствующей элементной базы для управления пучками терагерцового излучения.

Приложения терагерцового лазерного излучения, такие как построение систем безопасности и мониторинга (включая лидарные системы), управление непрерывным разрядом в газах, абляция поверхностей (в том числе биологических образцов), формирование поверхностных плазмон-поляритонов и т. д., требуют решения задачи эффективного управления амплитудно-фазовым распределением в сечении мощного пучка терагерцового лазера. Значительное количество работ [2–5] посвящено созданию линз и дифракционных решёток терагерцового диапазона, однако для эффективного применения когерентного терагерцового излучения необходимо создание элементов с более широкими функциональными возможностями: фокусировкой в заданные двух- и трёхмерные области, фокусировкой с повышенной глубиной фокуса, управлением поперечно-модовым составом пучка и т. д. В случае создания элементов для управления мощными пучками большое значение имеет выбор оптического материала. В [6] показано, что применение полимерных элементов для управления мощными пучками терагерцового излучения ограничено в силу невысокой лучевой стойкости полимерных материалов. В [4, 5] приведены результаты исследования силовых бинарных кремниевых линз и делителей пучка терагерцового диапазона, созданных с помощью технологии плазмохимического травления. После изготовления дифракционного микрорельефа на поверхность элементов наносилось антиотражающее покрытие.

тие. Исследование полученных элементов показало их высокую лучевую стойкость (свыше 4 кВт/см^2), однако элементы обладали невысокой энергетической эффективностью в силу бинарного (двухуровневого) дифракционного микрорельефа (теоретическая оценка для энергетической эффективности бинарной дифракционной линзы составляет 41 % [7]). В [8, 9] приведены результаты исследований бинарных кремниевых элементов, предназначенных для фокусировки пучка терагерцового лазера в заданные двух- и трёхмерные области и изготовленных с помощью технологии, описанной в [5]. В [10, 11] представлены результаты исследования кремниевых бинарных элементов, применяемых при формировании мощных пучков терагерцового диапазона с заданным поперечно-модовым составом (в том числе пучков с орбитальным угловым моментом). Повысить энергетическую эффективность элементов, выполненных с помощью фотолитографии, можно путём увеличения числа уровней квантования рельефа, что повлечёт за собой значительное удорожание и усложнение технологии изготовления [12]. В [13, 14] на примере четырёхуровневой дифракционной линзы рассмотрено применение лазерной фемтосекундной абляции для формирования многоуровневого терагерцового дифракционного микрорельефа на поверхности кремниевой пластины, а в [15] на основе аналогичного подхода создан элемент с 64-уровневым дифракционным микрорельефом. Такой подход в ближайшем будущем позволит существенно удешевить выпуск силовых кремниевых дифракционных оптических элементов с высокой энергетической эффективностью. Однако в случае использования лазеров на свободных электронах применение дифракционных оптических элементов ограничено излучением с длиной волны, на которую рассчитан дифракционный оптический элемент, в то время как конструкция лазера на свободных электронах позволяет генерировать излучение практически на любой длине волны рабочего диапазона.

Альтернативой дифракционным оптическим элементам являются силовые отражающие элементы терагерцового диапазона с поверхностями свободной формы, тем более что для формирования отражающих поверхностей терагерцового диапазона не требуются высокоразрешающие технологии, используемые для создания элементов свободной формы оптического диапазона [16].

Цель работы — изготовление с помощью технологии микрофрезерования и экспериментальное исследование отражающих (сферическое и цилиндрическое зеркала) оптических элементов с поверхностями свободной формы (элементы рассчитывались на угол падения пучка 45°).

В качестве источника когерентного терагерцового излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ) в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г. И. Будкера СО РАН, являющийся на данный момент самым мощным в мире источником терагерцового излучения.

Изготовление отражающих поверхностей. Основные факторы, влияющие на качество оптического элемента: допуск размера, допуск формы, допуск расположения (децентровка), шероховатость поверхности [17]. Допуски размера, формы и расположения в случае микрофрезерования заготовок размерами порядка 100 мм обусловлены возможностями оборудования и в настоящее время составляют величину менее 20 мкм для серийно производимых станков с числовым программным управлением [18]. Шероховатость поверхности обусловлена в первую очередь режимом обработки и характеристиками используемого инструмента. Допустимый уровень шероховатости оптической поверхности может быть оценён по методике [19]. Для оптических элементов, рассматриваемых в данной работе, допустимый уровень шероховатости Ra , рассчитанный по этой методике, составил $\approx 8,2$ мкм при расчётной длине волны $\lambda = 129,5$ мкм.

Приведённая предварительная оценка позволяет предположить, что в ряде случаев возможно получить требуемую шероховатость поверхности уже на этапе чистового фрезерования без необходимости последующей шлифовки и полировки изделий [20]. В случае

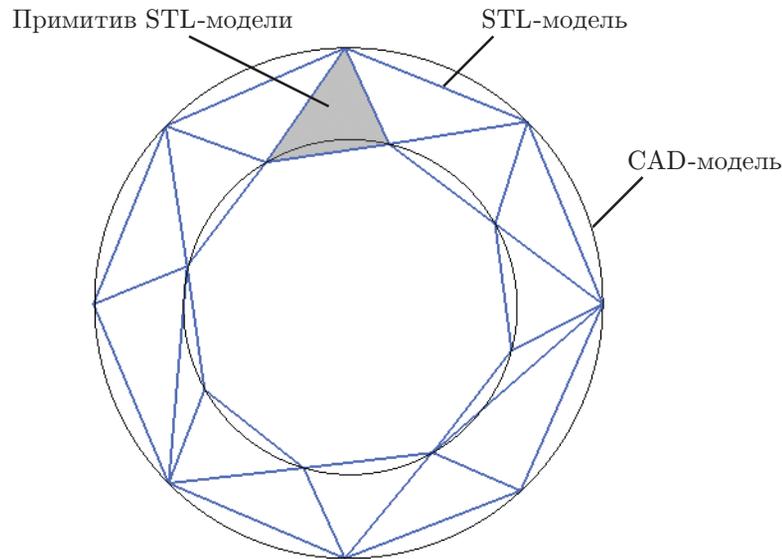


Рис. 1. Погрешность, вносимая STL-форматом задания 3D-модели

построения 3D-модели поверхности оптического элемента в CAD-системе в модель поверхности вносятся дополнительные погрешности дискретизации и квантования, связанные со стандартными форматами представления данных, таких как STEP или STL [21] (рис. 1).

В предлагаемой работе для построения чистой траектории использовалась непосредственная генерация G-кода с помощью разработанного авторами программного обеспечения, черновая траектория генерировалась с помощью пакетов Компас 3D и ArtCAM. Применение вышеописанного подхода позволило избежать внесения в топологию поверхности погрешностей, связанных с особенностями стандартных форматов хранения 3D-моделей.

В рамках данной работы были изготовлены оптические элементы ТГц-диапазона следующих типов: сферическое и цилиндрическое зеркала (угол падения освещающего пучка 45°). Рассчитанные отражающие поверхности были реализованы путём микрофрезерования на подложках из алюминиевого сплава Д16Т на трёхкоординатном фрезерном станке SIC330 [22]. Для черновой обработки использовалась однозаходная цилиндрическая концевая фреза диаметром 3 мм, для чистовой — сферическая диаметром 1 мм. Частота вращения шпинделя составляла 20 000 об./мин, подача в режиме чистовой обработки — 800 мм/мин. После чистовой обработки дополнительная шлифовка и полировка не проводились.

Как видно на рис. 2, качество полученной при прямой генерации G-кода чистой траектории существенно выше, что свидетельствует об эффективности предложенной схемы генерации чистой траектории.

Экспериментальное исследование изготовленных элементов. В ходе оптического эксперимента на рабочей станции НЛСЭ (длина волны освещающего пучка $\lambda = 129,5$ мкм) были исследованы следующие оптические элементы: сферическое зеркало (угол 45° , фокусное расстояние 180 мм, размер 100×70 мм) и цилиндрическое зеркало (угол 45° , фокусное расстояние 150 мм, размер 100×70 мм). На рис. 3 представлена оптическая установка для изучения изготовленных элементов.

Измеренная энергетическая эффективность для сферического зеркала составила свыше 94 %, что хорошо согласуется с ранее полученными численными оценками. В частности, измеренная ширина фокального пятна сферического зеркала на половине высоты составила 0,75 мм, что весьма близко к расчётному значению 0,78 мм. Исследуемое фокальное пятно показано на рис. 4, а. На рис. 4, б представлено распределение интенсивности,

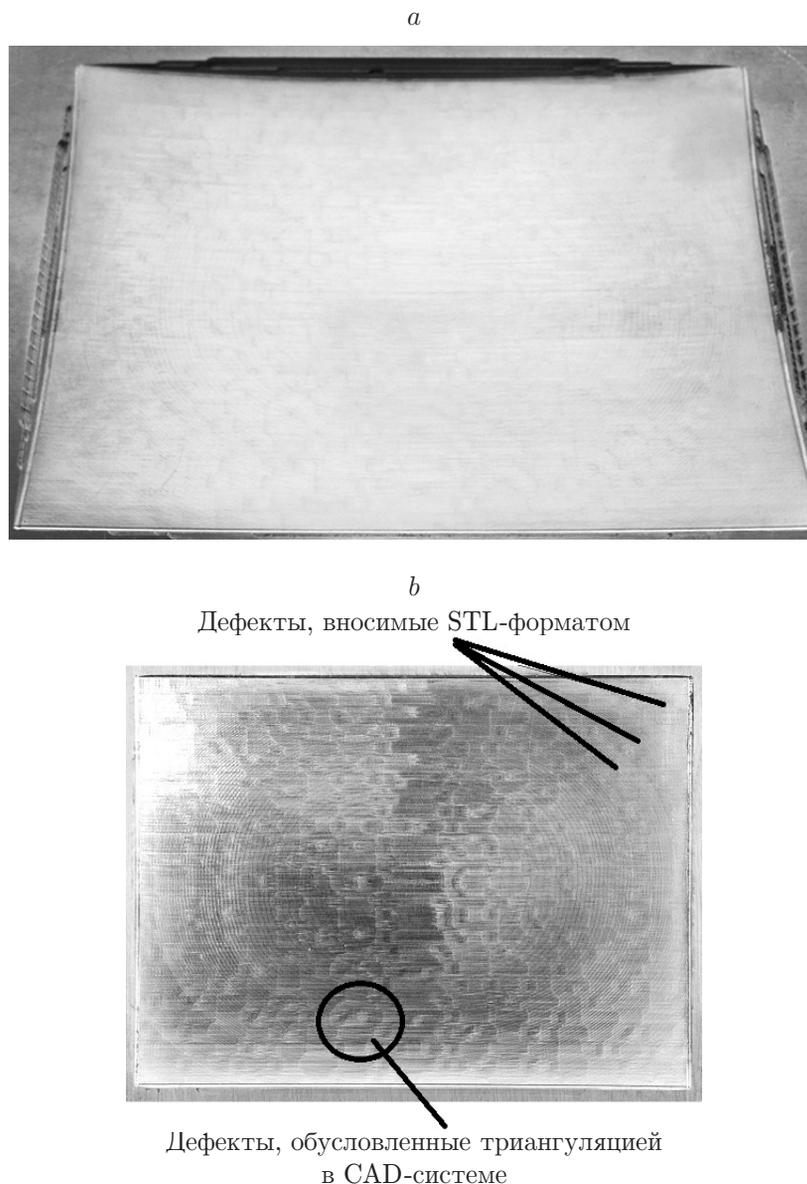


Рис. 2. Внешний вид цилиндрического зеркала, изготовленного: *a* — с прямой генерацией G-кода чистовой траектории, *b* — с генерацией G-кода чистовой траектории с помощью программного обеспечения Компас 3D + ArtCAM на максимальных настройках точности

сформированное в фокусе цилиндрического зеркала из гауссова освещающего пучка терагерцового лазера на свободных электронах. Имеющиеся отклонения измеренного распределения интенсивности от расчётного могут являться следствием наличия дискретности в движении обрабатывающего инструмента по траектории, что является неустранимым свойством шаговых двигателей и сервоприводов, а также действия совокупности факторов, приводящих к возникновению так называемой ошибки формы оптического элемента (ошибка интерполятора; погрешность, заложенная в управляющих программах; погрешность установки, базирования и закрепления заготовки на станке; погрешность настройки инструмента и станка на размер и т. д.).

Следует отметить возможное наличие отклонений освещающего пучка от гауссова, что также может повлиять на полученное распределение интенсивности.



Рис. 3. Оптическая установка для исследования изготовленных элементов

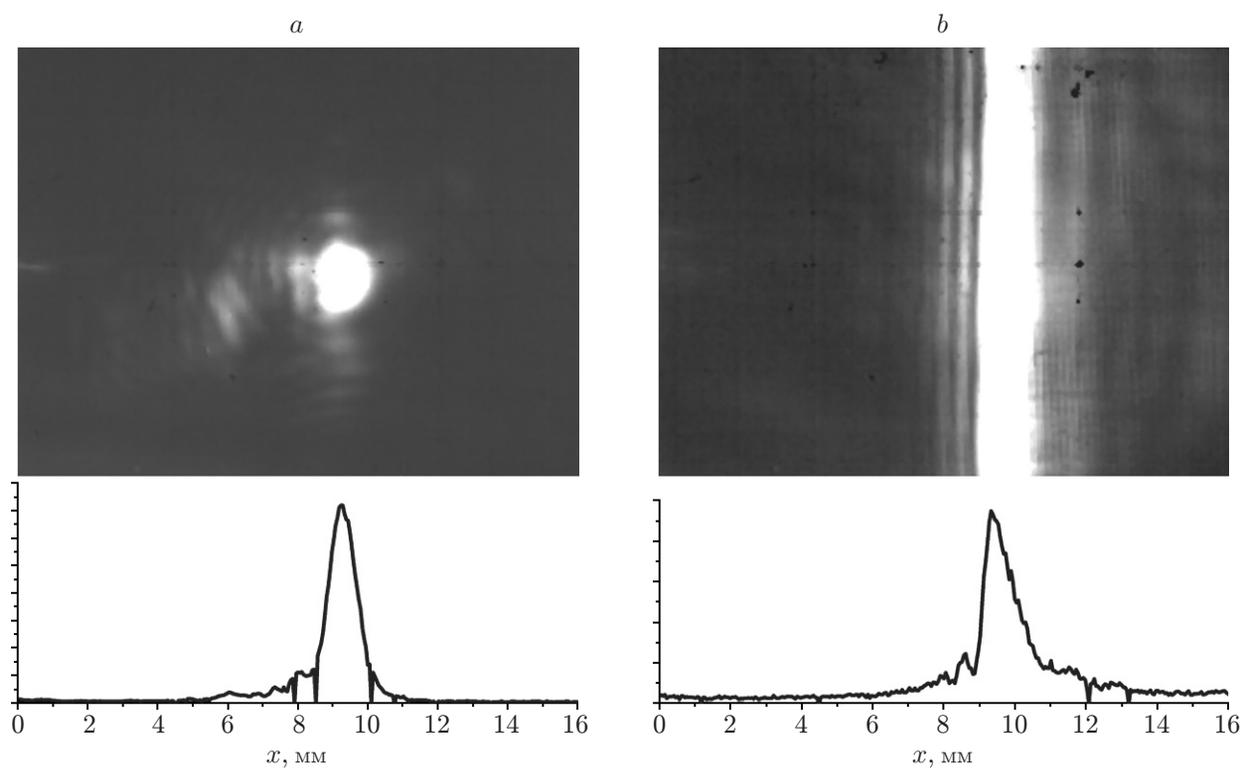


Рис. 4. Распределение интенсивности, сформированное в фокусе: сферического (a) и цилиндрического (b) зеркал

Заключение. В предлагаемой работе приведены результаты исследования отражающих элементов терагерцового диапазона: сферического и цилиндрического зеркал (угол падения освещающего пучка 45°). Экспериментально показано, что применение технологии микрофрезерования без дополнительных операций шлифовки и полировки даёт возможность создавать фокусирующие отражающие элементы терагерцового диапазона с энергетической эффективностью свыше 94 %, что является достаточным для большинства приложений. По мнению авторов, дальнейшее совершенствование технологии изготовления отражающих поверхностей позволит повысить эффективность элементов. Полученные результаты дают основание рассчитывать на создание высокоэффективных отражающих элементов терагерцового диапазона с поверхностями свободной формы различного назначения (формирование заданной диаграммы направленности, формирование бездифракционных пучков) в тех случаях, когда задача управления пучком когерентного излучения имеет непрерывное решение, реализуемое с помощью технологий механической обработки.

Благодарности. Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (расчёт и численное моделирование элементов, проект 16.7894.2017/6.7) и в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН» (изготовление элементов), а также при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (анализ погрешностей изготовления, грант № 18-29-03303).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulipanov G. N., Bagryanskaya E. G., Chesnokov E. N. et al. Novosibirsk free electron laser—facility description and recent experiments // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. **5**, N 5. P. 798–809.
2. Walsby E. D., Wang S., Xu J. et al. Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves // Journ. Vac. Sci. Technol. B. 2002. **20**, N 6. P. 2780–2783.
3. Furlan W. D., Ferrando V., Monsoriu J. A. et al. 3D printed diffractive terahertz lenses // Opt. Lett. 2016. **41**, N 8. P. 1748–1751
4. Агафонов А. Н., Власенко М. Г., Володкин Б. О. и др. Дифракционные линзы для мощных пучков терагерцового излучения // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2013. **77**, № 9. С. 1330–1332.
5. Агафонов А. Н., Володкин Б. О., Кавеев А. К. и др. Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического терагерцового излучения // Автометрия. 2013. **49**, № 2. С. 98–105.
6. Knyazev B. A., Cherkassky V. S., Choporova Yu. Yu. et al. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application // Journ. Infrared Milli Terahz Waves. 2011. **32**, N 10. P. 1207–1222.
7. Головашкин Д. Л., Досколович Л. Л., Казанский Н. Л. и др. Дифракционная компьютерная оптика. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
8. Agafonov A. N., Volodkin B. O., Kachalov D. G. et al. Focusing of Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) radiation into paraxial segment // Journ. Modern Opt. 2016. **63**, N 11. P. 1051–1054.
9. Agafonov A. N., Volodkin B. O., Volotovskiy S. G. et al. Optical elements for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain // Opt. Memory Neural Networks (Inform. Opt.). 2014. **23**, N 3. P. 185–190.

10. **Agafonov A. N., Choporova Yu. Yu., Kaveev A. K. et al.** Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation // *Appl. Opt.* 2015. **54**, N 12. P. 3635–3639.
11. **Кныазев В. А., Choporova Yu. Yu., Mitkov M. S. et al.** Generation of Terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum // *Phys. Rev. Lett.* 2015. **115**, N 16. 163901.
12. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Вейко В. П. и др.** Лазерные технологии в микрооптике. Ч. II. Изготовление элементов с трёхмерным микрорельефом // *Автометрия*. 2018. **54**, № 2. С. 3–19.
13. **Комленок М. С., Володкин Б. О., Князев Б. А. и др.** Создание линзы Френеля терагерцевого диапазона с многоуровневым микрорельефом методом фемтосекундной лазерной абляции // *Квантовая электроника*. 2015. **45**, № 10. С. 933–936.
14. **Pavelyev V. S., Komlenok M. S., Volodkin B. O. et al.** Fabrication of high-effective silicon diffractive optics for the terahertz range by femtosecond laser ablation // *Phys. Procedia*. 2016. **84**. P. 170–174.
15. **Minkevičius L., Indrišiūnas S., Šniaukas R. et al.** Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon // *Opt. Lett.* 2017. **42**, N 10. P. 1875–1878.
16. **Blalock T., Medicus K., Nelson J.** Fabrication of freeform optics // *Proc. SPIE*. 2015. **9575**. 95750H. DOI: 10.1117/12.2188523.
17. **Макарова Д. Г.** Критерии выбора технологии формообразования оптических поверхностей линз для субмиллиметрового диапазона спектра // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. **59**, № 2. С. 159–163.
18. **Hansel A., Yamazaki K., Konishi K.** Improving CNC machine tool geometric precision using manufacturing process analysis techniques // *Procedia CIRP*. 2014. **14**. P. 263–268.
19. **Ефремов В. С., Корякин Р. А., Логачёв А. В. и др.** Об отражательной способности шероховатой поверхности в субмиллиметровом диапазоне спектра // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. **5**, № 2. С. 227–231.
20. **Routara B. C., Bandyopadhyay A., Sahoo P.** Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: Effect of workpiece material variation // *Int. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2009. **40**, Is. 11–12. P. 1166–1180.
21. **Grimm T.** User's Guide to Rapid Prototyping. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2004. 420 p.
22. **Модель SIC330DSP.** ForSign, 2018. URL: http://sicono.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=62 (дата обращения: 5.12.2018).

Поступила в редакцию 05.12.2018

После доработки 20.02.2019

Принята к публикации 21.02.2019
