

Создание линзы Френеля терагерцевого 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

Исследована возможность создания кремниевой дифракционной четырехуровневой линзы Френеля терагерцевого диапазона методом лазерной абляции. Для формирования микрорельефа на поверхности образца использовался фемтосекундный Yb:YAG-лазер с высокой частотой следования импульсов ($f = 200$ кГц). Характеристики дифракционного оптического элемента были исследованы в пучке лазера на свободных электронах на длине волны 141 мкм. Измеренная дифракционная эффективность линзы хорошо согласуется с теоретической оценкой.

Ключевые слова: дифракционная оптика, лазеры на свободных электронах, терагерцевое излучение, лазерная абляция.

1. Введение

Появление мощных источников когерентного терагерцевого излучения [1] сформировало потребность в оптических элементах для управления таким излучением. Известно, что для управления пучками мощного терагерцевого излучения могут быть использованы кремниевые дифракционные линзы и делители пучка [2, 3]. В работе [4] приведены результаты исследования дифракционного оптического элемента (ДОЭ), фокусирующего гауссов пучок терагерцевого лазера на свободных электронах (ЛСЭ) в квадратную фокальную область, в [5] – результаты исследования бинарных ДОЭ, предназначенных для формирования мод Гаусса–Эрмита и Гаусса–Лагерра из освещающего гауссова пучка терагерцевого лазера. Ранее ДОЭ широко применялись в оптическом приборостроении УФ, видимого и ИК диапазонов [6]. Применение ДОЭ позволяет создавать оптические приборы с уменьшенными массогабаритными характеристиками и широкими функциональными возможностями [6]. Все дифракционные элементы терагерцевого диапазона, результаты исследования которых приведены в [2–5], изготовлены

методом литографического травления кремниевой подложки. Такой подход обладает недостатками: изготовление многоуровневых элементов методом литографического травления требует дорогостоящей и достаточно сложной процедуры совмещения фотошаблонов [7], а бинарные (двухуровневые) элементы имеют ограниченную энергетическую эффективность [6].

В настоящей статье приведены результаты исследования кремниевой четырехуровневой дифракционной линзы терагерцевого диапазона (рабочая длина волны 141 мкм), изготовленной методом абляции кремниевой поверхности излучением импульсно-периодического дискового Yb:YAG-лазера. Ранее в [8] подход, основанный на лазерной абляции поверхности подложки, применялся для изготовления силовой дифракционной оптики ИК диапазона на алмазных пластинах. Отметим, что лазерная абляция позволяет формировать многоуровневый дифракционный микрорельеф не за счет применения дорогостоящего комплекта фотошаблонов, а с помощью варьирования параметров лазерного излучения и использования трансляционного стола для передвижения образца [8–10]. Основной сложностью предложенного метода является создание глубокого, до 43.6 мкм, рельефа с гладким дном, т. к. в процессе лазерной абляции с ростом глубины профиля происходит развитие шероховатости в зоне облучения. С целью минимизации шероховатости в настоящей работе применен лазер с фемтосекундной длительностью импульса, в отличие от работ по созданию алмазных ДОЭ, в которых использовался эксимерный наносекундный лазер [8–10]. Для повышения скорости лазерной обработки выбран режим работы с повышенной (до 200 кГц) частотой следования импульсов f и, соответственно, большой средней мощностью (до 30 Вт), причем в каждом импульсе интенсивность сфокусированного излучения была достаточно высока для испарения кремния.

Тестирование дифракционного элемента, изготовленного методом лазерной абляции, проводилось на рабочей станции новосибирского ЛСЭ [1].

М.С.Комленок, В.В.Кононенко, Т.В.Кононенко, В.И.Конов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: komlenok@nsc.gpi.ru

Б.О.Володкин, К.Н.Тукмаков. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева, Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

Б.А.Князев, Ю.Ю.Чопорова. Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В.С.Павельев, В.А.Сойфер. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; Институт систем обработки изображений РАН, Россия, 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151

2. Создание дифракционной линзы терагерцевого диапазона

Для производства ДОО терагерцевого диапазона, работающих с высокоэнергетическими пучками (например, с излучением ЛСЭ), в качестве исходного материала целесообразно использовать нелегированный высокоомный кремний [2, 3]. В настоящей работе была использована подложка из высокоомного кремния диаметром 30 мм и толщиной 1 мм с двухсторонней полировкой оптического качества.

Расчетная высота микрорельефа дифракционной линзы определяется формулой [6]

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

где n – показатель преломления материала подложки;

$$\varphi(r) = -k\frac{r^2}{2f} \quad (2)$$

– фазовая функция линзы [6], приведенная к диапазону $[0, 2\pi]$. Непрерывная фазовая функция в настоящей работе заменялась ее ступенчатой четырехуровневой аппроксимацией (квантовалась по четырем уровням [6]).

Для расчета использовались следующие параметры линзы: диаметр апертуры 30 мм, рабочая длина волны 141 мкм, фокусное расстояние 120 мм, радиальный шаг дискретизации фазовой функции 250 мкм; число уровней квантования микрорельефа равнялось четырем. Четырехуровневый микрорельеф был реализован на поверхности кремниевой пластины с помощью метода лазерной абляции. Структурирование высокоомного кремния осуществлялось дисковым Yb:YAG-лазером ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 400$ фс, $f = 200$ кГц). Распределение энергии на поверхности образца было гауссовым (диаметр по уровню $1/e$ составлял примерно 10 мкм), максимальная плотность энергии в импульсе была равна 15 Дж/см² и значительно превышала порог абляции (~ 0.5 Дж/см² [11]). Выбор высокой плотности энергии был обусловлен необходимостью удаления большого объема материала. Для создания четырехуровневой линзы Френеля требовалось профилирование поверхности в форме концентрических колец шириной 250 мкм различной глубины – 14.5, 29.1 и 43.6 мкм, соответствующей фазовым функциям линзы $3\pi/2$, π и $\pi/2$.

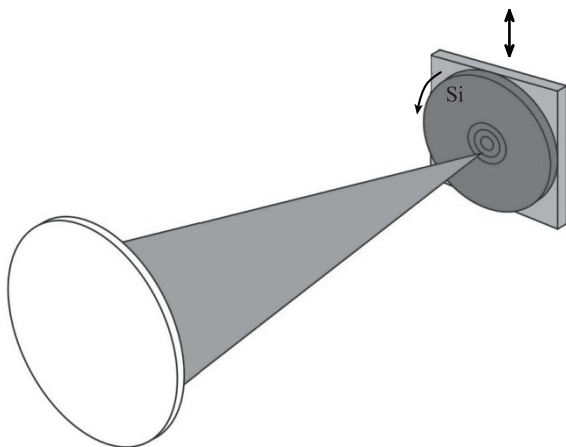


Рис.1. Схема лазерного облучения ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 400$ фс, $f = 200$ кГц) кремниевой пластины для создания заданного профиля на поверхности.

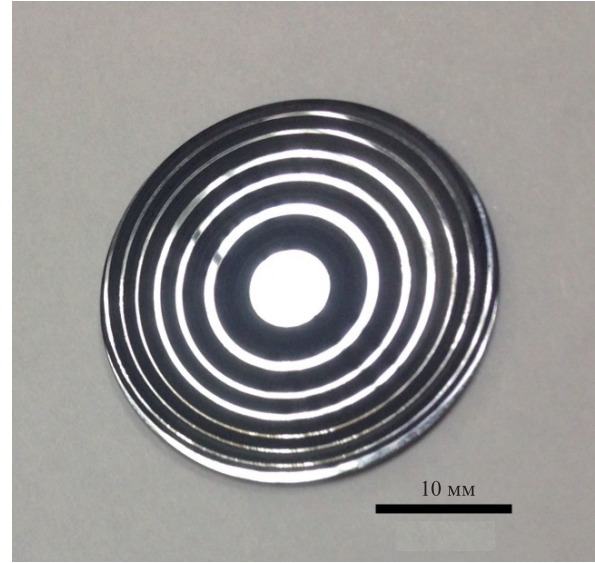


Рис.2. Фотография изготовленной кремниевой четырехуровневой линзы Френеля.

Образец был закреплен на вращающемся диске, ось которого перемещалась вверх-вниз с помощью трансляционного стола (рис.1). Глубина профиля варьировалась путем изменения числа проходов. Фотография изготовленной линзы представлена на рис.2.

3. Контроль геометрических параметров микрорельефа

Сформированный микрорельеф обладает развитой топологией поверхности и относительно большим перепадом высот, что исключает использование для измерения высоты полученного рельефа интерферометрии белого света и сканирующей зондовой микроскопии. Для измерения высоты дифракционного микрорельефа скол изготовленной линзы рассматривался с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) (FEI Quanta 200) (рис.3).

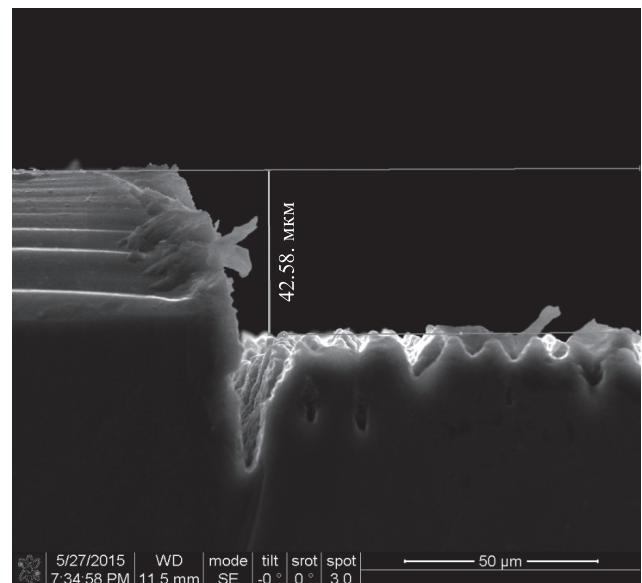


Рис.3. РЭМ-изображение фрагмента скола линзы (соответствует расчетному перепаду высот 43.6 мкм)

Результаты электронной микроскопии показывают, что использование метода лазерной абляции позволяет реализовать заданную высоту дифракционного микрорельефа с достаточно высокой точностью. Вместе с тем, стоит отметить значительную шероховатость обработанной поверхности и наличие углубления вблизи края ступени, которое объясняется замедлением трансляционного стола при смене направления движения. Размер шероховатости увеличивался с ростом глубины профиля и составил около 5 мкм при максимальной глубине 43.6 мкм.

4. Исследование элемента с помощью новосибирского лазера на свободных электронах

На рис.4 изображена схема эксперимента, в ходе которого излучение ЛСЭ с длиной волны 141 мкм освещало изготовленную кремниевую четырехуровневую дифракционную линзу. Для измерения распределения интенсивности вдоль оптической оси использовался матричный микроболометрический приемник (ММБП) 320×240, который позволяет снимать как видео, так и отдельные кадры [12]. Физический размер ММБП равен 16×12 мм, размер одного пикселя матрицы составляет 50 мкм. ММБП был помещен на моторизованную подвижку и перемещался вдоль оптической оси на расстоянии 100–165 мм от ДОЭ.

Измеренное осевое распределение интенсивности, формируемое изготовленной линзой, представлено на рис.5. Смещение фокальной плоскости на 5 мм вдоль оптиче-

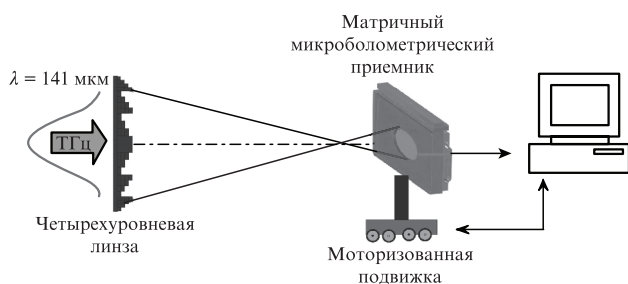


Рис.4. Оптическая схема установки для тестирования дифракционной линзы.

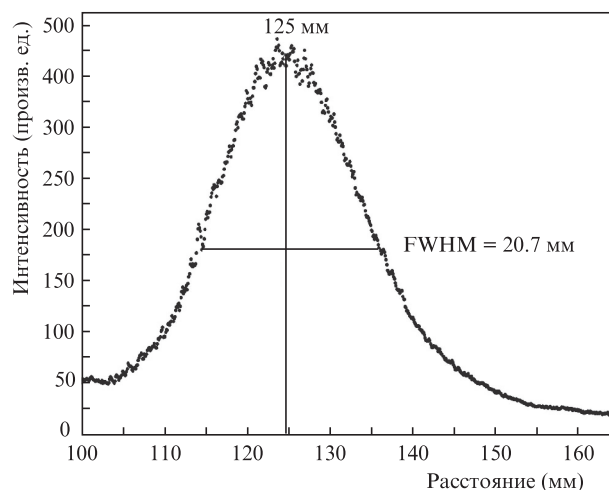


Рис.5. Измеренное распределение интенсивности вдоль оптической оси. Точки – экспериментальные данные, вертикальной линией отмечен максимум мощности пучка в плоскости, находящейся на расстоянии ~125 мм от дифракционной линзы.

ской оси объясняется, видимо, отклонением волнового фронта освещающего пучка от плоского.

На рис.6 приведены трехмерные распределения интенсивности в плоскостях, отстоящих от плоскости установки дифракционной линзы на расстояния 115, 125 и 135 мм. Отметим сохранение гауссовой формы сфокусированного пучка.

Измеренная в ходе эксперимента дифракционная эффективность линзы составила 35.9%. Оценка потерь на френелевское отражение [13] в кремниевой пластине (показатель преломления кремния $n = 3.42$) составляет около 51% от энергии исходного пучка. Таким образом, при нанесении антиотражающего покрытия дифракционная эффективность элемента может быть в принципе повышена почти до 75%, что неплохо согласуется с теоретической оценкой 81% [6]. Некоторое снижение дифракционной эффективности объясняется, видимо, рассеянием на неоднородностях, образующихся при обработке поверхности кремния лазерными импульсами с высокой плотностью энергии. Известно, что использование плотности энергии, значительно превышающей порог абляции кремния, приводит к образованию на поверхности вулканообразных структур [11]. Поэтому одним из способов повыше-

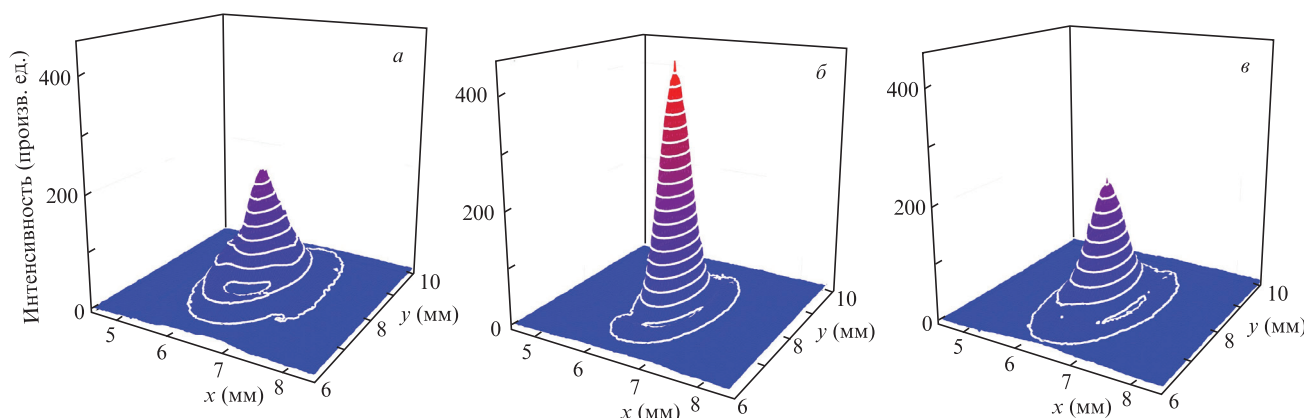


Рис.6. Трехмерные распределения интенсивности в плоскостях, отстоящих от плоскости установки линзы на расстояния 115 (а), 125 (б) и 135 мм (в).

ния эффективности является оптимизация условий лазерной обработки образца.

Другой способ заключается в уменьшении френелевских потерь на отражение, для чего на кремниевые ДОЭ терагерцевого диапазона может наноситься двустороннее антиотражающее покрытие из парилена [2,3]. Ранее парилена в качестве антиотражающего покрытия был использован в работах [14, 15]. В [2] экспериментально показано, что нанесение двустороннего антиотражающего покрытия на кремниевые ДОЭ терагерцевого диапазона позволяет снизить френелевские потери до пренебрежимо малых значений. Таким образом, разработка технологии формирования многоуровневого дифракционного микрорельефа совместно с последующим нанесением антиотражающего покрытия позволит решить задачу создания высокоэффективной многофункциональной оптики для управления мощными пучками излучения терагерцевого лазера.

5. Заключение

Впервые с помощью фемтосекундной лазерной абляции создана многоуровневая кремниевая дифракционная линза Френеля терагерцевого диапазона. Морфология полученного ДОЭ изучена на растровом электронном микроскопе.

Проведено тестирование кремниевой линзы Френеля на ЛСЭ с длиной волны 141 мкм и измерена ее дифракционная эффективность, которая составила 35.9%. Результаты натурного исследования изготовленной четырехуровневой дифракционной линзы находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования.

Проведенные эксперименты показали целесообразность применения метода лазерной абляции кремниевой поверхности для создания эффективных многоуровневых ДОЭ терагерцевого диапазона.

Совершенствование предлагаемой технологии формирования кремниевого микрорельефа, в частности увеличение числа уровней его квантования, позволит в перспективе повысить энергетическую эффективность кремниевых ДОЭ, предназначенных для фокусировки пучков терагерцевого излучения.

Экспериментальные исследования поддержаны Минобрнауки РФ и РФФИ (грант № 15-02-06444). Разработка и изготовление ДОЭ выполнены при поддержке Минобрнауки РФ, в том числе в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013–2020 гг., Государственного задания вузам и научным организациям в

сфере научной деятельности (проект № 1879). Оборудование для исследования характеристик ДОЭ изготовлено при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-50-00080). Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский Центр синхротронного и терагерцевого излучения» на уникальной установке «Новосибирский ЛСЭ». Лазерные исследования, проведенные в Институте общей физики РАН, поддержаны грантом Российского научного фонда (проект № 14-22-00243).

1. Knyazev V.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. *Measur. Sci. Technol.*, **21**, 054017 (2010).
2. Агафонов А.Н., Володкин Б.О., Кавеев А.К., Князев Б.А., Кропотов Г.И., Павельев В.С., Соيفер В.А., Тукмаков К.Н., Цыганкова Е.В., Чопорова Ю.Ю. *Автометрия*, **49** (2), 98 (2013).
3. Агафонов А.Н., Власенко М.Г., Володкин Б.О., Герасимов В.В., Кавеев А.К., Князев Б.А., Кропотов Г.И., Павельев В.С., Пальчикова И.Г., Соифер В.А., Ступак М.Ф., Тукмаков К.Н., Цыганов Е.В., Чопорова Ю.Ю. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **77** (9), 1330 (2013).
4. Агафонов А.Н., Володкин Б.О., Волоотовский С.Г., Кавеев А.К., Князев Б.А., Кропотов Г.И., Тукмаков К.Н., Павельев В.С., Цыганкова Е.В., Цыпишка Д.И., Чопорова Ю.Ю. *Компьютерная оптика*, **37** (4), 464 (2013).
5. Агафонов А.Н., Чопорова Ю.Ю., Кавеев А.К., Князев В.А., Кропотов Г.И., Павельев В.С., Тукмаков К.Н., Володкин В.О. *Appl. Opt.*, **54** (12), 3635 (2015).
6. Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Соифер В.А., Хонина С.Н. *Дифракционная компьютерная оптика* (М.: Физматлит, 2007, с. 736).
7. Walsby E.D., Wang S., Xu J., Yuan T., Blaikie R., Durbin S.M., Zhang X.-C., Cumming D.R.S. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20** (6), 2780 (2002).
8. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Golovashkin D.L., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Duparré M., Luedge B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5456**, 209 (2004).
9. Кононенко В.В., Конов В.И., Павельев В.С., Пименов С.М., Прохоров А.М., Соифер В.А. *Квантовая электроника*, **26** (1), 9 (1999).
10. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Kazanskiy N.L., Golovashkin D.L., Volkov A.V., Kostyuk G.F., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Komlenok M.S., Duparré M.R., Luedge B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6290**, B2900 (2006).
11. Bonse J., Baudach S., Krüger J., Kautek W., Lenzner M. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, **74** (1), 19 (2002).
12. Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Knyazev V.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (13), 131116 (2008).
13. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970).
14. Gatesman A.J. *Microwave Guided Wave Lett.*, **10**, 264 (2000).
15. Hübers H.W., Schubert J., Krabbe A., Birk M., Wagner G., Semenov A., Gol'tsman G., Voronov B., Gershenson E. *Infr. Phys. Technol.*, **42** (1), 41 (2001).