

УДК 681.7:535.4

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2013 г. А. Н. Агафонов⁴, М. Г. Власенко^{1,2}, Б. О. Володкин⁴, В. В. Герасимов^{1,2}, А. К. Кавеев⁵,
Б. А. Князев^{1,2}, Г. И. Кропотов⁵, В. С. Павельев^{3,4}, И. Г. Пальчикова⁶, В. А. Соيفер^{3,4},
М. Ф. Ступак⁶, К. Н. Тукмаков⁴, Е. В. Цыганкова⁵, Ю. Ю. Чопорова^{1,2}

E-mail: Yu.Yu.Choporova@inp.nsk.su

Описаны технологии изготовления кремниевой дифракционной бинарной (двухуровневой) линзы и полипропиленовой киноформной дифракционной линзы для терагерцевого диапазона спектра. Элементы имеют толщину 1 и 0.8 мм соответственно. Кремниевая линза изготовлена в двух вариантах: без покрытия и с просветляющим покрытием из парилена С (полипараксилилена). Характеристики дифракционных оптических элементов исследовались в пучке импульсно-периодического лазера на свободных электронах при длине волны 141 мкм и частоте повторения импульсов 5.6 МГц. На Новосибирском лазере на свободных электронах проведены испытания лучевой прочности париленового покрытия, которое выдержало без повреждений облучение при средней плотности мощности излучения $4 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$, пиковая мощность в 100-пикосекундном импульсе при этом составляла около $8 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$.

DOI: 10.7868/S0367676513090032

ВВЕДЕНИЕ

Дифракционная компьютерная оптика развивается более 25 лет, начиная с основополагающих работ А.М. Прохорова, И.Н. Сисакяна и В.А. Соифера (см., например, [1]). Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) нашли широкое применение в лазерных технологических установках, оптических приборах и устройствах хранения и поиска информации. ДОЭ могут осуществлять различные функциональные преобразования световых полей, выполнять функции сложного многолинзового объектива, коррекцию сферических или хроматических аберраций и т.д. Использование

плоских элементов в оптических схемах, особенно использующих монохроматические лазерные источники света, открывает перспективу создания дешевых, компактных и функционально сложных приборов. ДОЭ — это наиболее перспективные элементы для управления излучением на ТГц-частотах, особенно в случае мощного монохроматического пучка лазера на свободных электронах (ЛСЭ) [2]. Такие приложения, как получение терагерцевых изображений, мягкая абляция, генерация оптического разряда, и многие другие требуют фокусировки излучения. В этой статье мы приводим технологии изготовления двух типов дифракционных оптических элементов: киноформной дифракционной линзы (КДЛ) и бинарной дифракционной линзы (БДЛ). Исследования характеристик проводились на рабочей станции Новосибирского ЛСЭ.

БИНАРНАЯ (ДВУХУРОВНЕВАЯ) ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА

В данной статье была рассчитана, изготовлена и исследована бинарная дифракционная линза с фокусным расстоянием 120 мм, диаметром апертуры 30 мм и расчетной длиной волны 130 мкм. Рассчитанный бинарный микрорельеф формировался на полированных подложках из высокоомного кремния марки HRFZ-Si [3] диаметром 100 мм и толщиной 1 мм. Производство БДЛ состояло из следующих этапов: а) отмывка и контроль параметров кремниевой пластины, б) создание защитной маски методом оптической литографии, в) реактив-

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), Новосибирск.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск.

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем обработки изображений Российской академии наук, Самара.

⁴ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)” (СГАУ), Самара.

⁵ Закрытое акционерное общество “Тидекс”, Санкт-Петербург.

⁶ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН), Новосибирск.

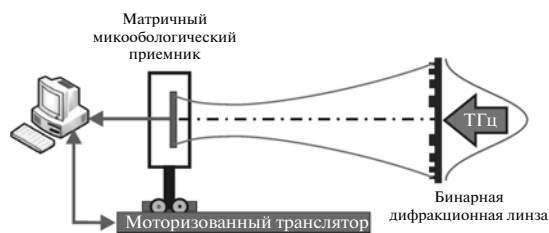


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента на ЛСЭ.

но-ионное травление (РИТ) кремния [4], г) удаление остатков металлической маски. Микрорельеф большой глубины (около 30 мкм) получали методом РИТ. В связи с низкой плазмостойкостью фоторезистивной маски ее нельзя использовать без дополнительного маскирующего слоя, иначе глубина рельефа и вертикальность стенок не будут удовлетворять требованиям, поэтому в данной работе применялись плазмостойкие металлические маски (использованы медь и алюминий). Для получения маски на кремниевую подложку наносилась тонкая пленка металла, в которой с помощью фотолитографии и химического травления получались “окна”, через которые после проводилось реактивно-ионное травление кремниевой подложки.

Подобные технологии РИТ с многоуровневой обработкой были использованы в [5]. Процесс нанесения пленки металла производился на установке “ЭТНА-100-МТ” (НТ-МДТ, Россия). Травление кремния выполнялось на установке “ЭТНА-100-ПТ” (НТ-МДТ, Россия). Для получения заданных рабочих характеристик ДОО было необходимо обеспечить угол отклонения стенок от вертикали не более 10° , поэтому был использован Bosch-процесс в индуктивно-связанной конфигурации источника плазмы (ICP-RIE) [6] в атмосфере C_4F_8/Ag (пассивация) и SF_6/Ag (травление). Контроль геометрических параметров формируемого микрорельефа осуществлялся методами интерферометрии белого света и растровой электронной микроскопии.

Оптические характеристики БДЛ были исследованы на одной из рабочих станций ЛСЭ. Испытания проводились по схеме, изображенной на рис. 1. Излучение ЛСЭ направлялось на дифракционный элемент, а изображение регистрировалось неохлаждаемым матричным микроболометрическим приемником [7], помещенным на моторизованную подвижку, перемещающуюся вдоль оси пучка.

Мы наблюдали два фокуса на расстояниях 121 и 42 мм, что прекрасно согласуется с предварительными расчетами и теоретическими ожиданиями. Значения дифракционной эффективности составили $21 \pm 3\%$ для главного фокуса и 3% для вторичного фокуса соответственно. Чтобы увели-

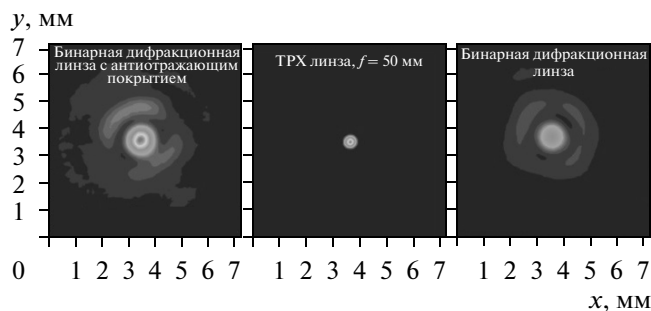


Рис. 2. Распределение интенсивности в фокальной плоскости БДЛ в сравнении с линзой ТРХ с фокусным расстоянием $f = 50$ мм.

чить дифракционную эффективность, линзы были покрыты просветляющим покрытием из парилена С. Парилена С в качестве просветляющего покрытия ранее был использован в работах [8, 9]. Для линз с просветляющим покрытием дифракционная эффективность составила $36 \pm 5\%$ и 3.6% соответственно. Мы проводили испытания радиационной стойкости БДЛ, облучая периферийную часть кремниевой пластинки с антиотражающим покрытием (вне дифракционной структуры) сфокусированным ТРХ-линзой терагерцевым излучением ЛСЭ. Абсолютные значения распределения плотности мощности излучения были измерены с помощью термочувствительного интерферометра [10]. Линзы не повреждались вплоть до значения плотности мощности $4 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ в максимуме гауссова распределения, что соответствует пиковой мощности для 100-пикосекундного импульса около $8 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$.

КИНОФОРМНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ (КДЛ)

В работе [11] описаны КДЛ с диаметром 25 мм и фокусным расстоянием 50 мм, изготовленные на полимере с помощью кремниевой штамповочной матрицы. В данной работе мы исследовали рабочие характеристики линз диаметром 80 мм с параболическим профилем френелевских зон, изготовленных методом горячей вакуумной штамповки полипропилена с использованием металлической матрицы. Для исследования были изготовлены КДЛ с фокусными расстояниями $f = 200$ и $f = 80$ мм для длины волны $\lambda = 130$ мкм (рис. 3).

Полипропилен – один из наименее поглощающих в терагерцевом диапазоне материалов. Благодаря очень малой толщине линз, равной 0.8 мм, линзы оказались практически прозрачными для терагерцевого излучения и выдерживали длительную работу в пучках мощностью несколько десятков ватт. Чтобы использовать всю рабочую апертуру КДЛ, терагерцевый пучок расширялся в 2.5 раза с помощью телескопа с внеосевыми параболически-

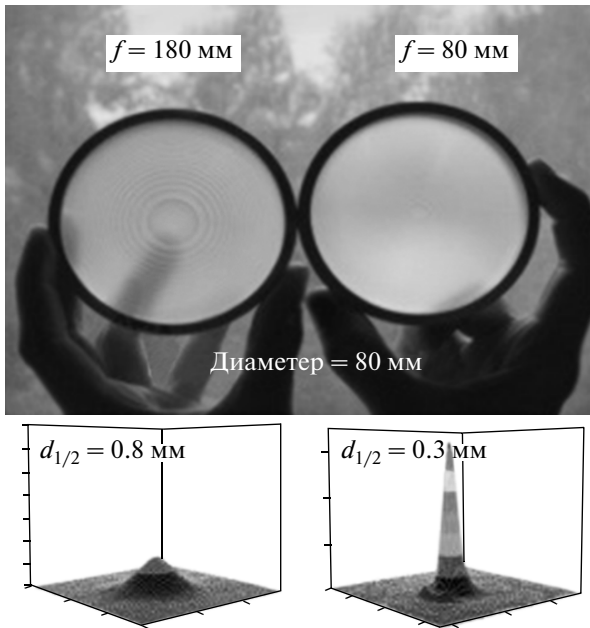


Рис. 3. Киноформные полипропиленовые дифракционные линзы и соответствующее распределение интенсивности в фокальных плоскостях.

ми зеркалами. Главный фокус линзы с фокусным расстоянием $f = 80$ мм наблюдался на расстоянии 77.6 мм (при длине волны излучения 141 мкм). Ширина на полувывоте пучка в районе каустики составила 0.23 мм. Фокус первого порядка, который, согласно теории, мог бы существовать на расстоянии 25 мм в случае неидеальности отштампованного профиля, мы не могли регистрировать из-за геометрических ограничений корпуса матрицы микроболометров. КДЛ широко используются на рабочих станциях ЛСЭ и для фокусировки, и для построения изображений с дифракционным пространственным разрешением [12].

ВЫВОДЫ

Эксперименты показали возможность применения технологий компьютерной дифракционной оптики для создания линз терагерцевого диапазона. Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с

известными теоретическими результатами и позволяют рассчитывать в перспективе на создание дифракционных оптических элементов терагерцевого диапазона, формирующих заданное двумерное распределение интенсивности – фокусаторов терагерцевого диапазона.

Совершенствование технологии формирования кремниевого микрорельефа, в частности увеличение числа уровней квантования микрорельефа, позволит в перспективе повысить дифракционную эффективность кремниевых элементов, предназначенных для фокусировки мощных пучков терагерцевого излучения.

Мы благодарим Г.Н. Кулипанова и Н.А. Винокурова за поддержку работы и команду лазера на свободных электронах за обеспечение стабильной работы установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и гранта РФФИ-офи-м 11-02-12171, работа выполнена с использованием оборудования ЦКП СЦСТИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. Соифера В.А. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
2. Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. // Meas. Sci. Technol. 2010. V. 21. 054017. 13 p.
3. <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>
4. Laermer F. et al. Method of anisotropically etching silicon. Pat. № 5501893. 1996.
5. Wang S., Xu J., Yuan T. et al. // J. Vacuum Sci. and Technol. B. 2002. V. 20. P. 2780.
6. Ayon A.A et al. // J. Electrochem. Soc. 1999. V. 146. № 1. P. 339.
7. Dem'yanenko M.A., Esaev D.G, Knyazev B.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. 131116.
8. Gatesman A.J. // Microwave and Guided Wave Letters. IEEE. 2000. V. 10. P. 264.
9. Hübers H.-W., Schubert J., Krabbe A. et al. // Phys. and Technol. 2001. V. 42. P. 41.
10. Vinokurov N.A., Knyazev B.A., Kulipanov G.N. et al. // Techn. Phys. 2007. V. 52. P. 911.
11. Walsby E.D., Alton J., Worrall C. et al. // Opt. Lett. 2007. V. 32. P. 1141.
12. Knyazev B.A., Cherkassky V.S., Choporova Y.Y. et al. // J. Inf. Millimeter and Terahertz Waves. 2011. V. 32. P. 1207.