

УПРАВЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНО-МОДОВЫМ СОСТАВОМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ БИНАРНОЙ КРЕМНИЕВОЙ ОПТИКИ

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

¹ Самарский 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 оптических экспериментов по формированию мод лазерного излучения из освещающего Гауссова пучка терагерцового лазера на свободных электронах (NovoFEL) с помощью бинарных кремниевых дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Исследования проводились на длине волны 141 мкм. Результаты оптических экспериментов находятся в соответствии с результатами компьютерного моделирования.

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

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) нашли широкое применение в лазерных технологических установках и оптических приборах видимого и инфракрасного диапазонов [1].

В работах [2, 3] приведены результаты исследования ДОЭ, предназначенных для формирования мод лазерного излучения видимого и инфракрасного диапазонов – *моданов*. Показано [2, 3], что методы дифракционной оптики позволяют формировать пучки когерентного излучения практически произвольного поперечно-модового состава. Создание дифракционных оптических элементов, формирующих пучки лазерного излучения заданного модового состава видимого и инфракрасного диапазонов, позволило решить ряд фундаментальных и прикладных задач [1]: формирование эталонных пучков, осуществление манипуляции микро- и наночастицами, повышение чувствительности волоконно-оптических сенсоров. В [3] приведена аналогия между созданием моданов и предшествующим созданием монохроматоров и призм – появление монохроматоров и призм позволило экспериментально подтвердить существование продольного спектра оптического излучения: были показаны возможности экспериментального формирования пучков с заданным продольно-спектральным составом, а также разложения белого света по продольно-спектральным компонентам. Появление моданов позволило формировать эталонные пучки когерентного света с заданным поперечно-модовым составом и измерять парциальную мощность мод, входящих в состав освещающего пучка [3].

Отметим, однако, что применение моданов для управления поперечно-модовым составом излучения газовых [1, 3], твердотельных и полупроводниковых [1] лазеров позволяет получать пучки с заданным поперечно-модовым составом на длине волны, соответствующей одной из продольных мод лазера. Появление лазеров на свободных электронах открыло возможность получения когерентных пучков на заданной длине вол-

ны [4]. Таким образом, обладая возможностью создания элементов для формирования пучков с заданным поперечно-модовым составом и используя возможности лазера на свободных электронах, можно получать пучки когерентного излучения заданного модового состава с заданной длиной волны.

В [4] приведены результаты исследования нового источника лазерного терагерцового излучения – Новосибирского лазера на свободных электронах (NovoFEL). Известны результаты исследования кремниевых бинарных дифракционных линз [5, 6] и делителей пучка [6] для управления лазерным терагерцовым излучением.

В [7] приведены результаты исследования кремниевых бинарных дифракционных фокусаторов, предназначенных для фокусировки Гауссова пучка терагерцового лазера в квадрат с равномерным распределением интенсивности.

В работе [8] приведены результаты формирования оптических вихрей терагерцового диапазона с помощью спиральной полимерной пластинки. В работе [9] разложение комплексной амплитуды по модовому базису Гаусса–Лагерра использовалось для анализа распространения пучка терагерцового излучения в свободном пространстве.

В данной работе приводятся первые результаты исследования бинарных кремниевых элементов, предназначенных для формирования одномодовых пучков (были выбраны моды Гаусса–Эрмита (1,0), Гаусса–Эрмита (1,1) и Гаусса–Лагерра (2,2)) из освещающего пучка лазера на свободных электронах.

1. Синтез ДОЭ, согласованных с Гауссовыми модами

Для изготовления ДОЭ в данной работе были использованы подложки оптического качества из кремния HRFZ-Si [10] с двухсторонней полировкой диаметром 30 мм и 38 мм и толщиной 1 мм. Получение бинарного микрорельефа высотой 29,1 мкм на поверхности подложки производилось с помощью реактивно-ионного травления кремния (РИТ). Была использована техноло-

гия формирования бинарного микрорельефа на поверхности кремниевой пластины, ранее использованная в [5–7] для изготовления бинарных дифракционных линз и делителей пучка терагерцового диапазона. Изготовление элементов осуществлялось в Научно-образовательном центре нанотехнологий СГАУ. Реактивно-ионное травление поверхности кремния осуществлялось с помощью установки ЭТНА-100-ПТ (производство компании НТ-МДТ, г. Зеленоград).

В качестве фазовых функций бинарных элементов выбирались фазовые портреты формируемых Гауссовых мод. Ранее в [1] было показано, что в случае формирования из освещающего Гауссова пучка Гауссовых мод низкого порядка с помощью чисто фазового элемента целесообразно выбирать в качестве фазовой функции бинарного элемента фазовый портрет формируемой моды, так как в этом случае, несмотря на воздействие только на фазу освещающего пучка, частичная мощность формируемой моды в пучке после элемента будет составлять свыше 70 %. Шум, возникновение которого связано с разницей между распределением интенсивности освещающего пучка и распределением интенсивности в сечении формируемой моды, приходится большей частью на моды высокого порядка. Так как моды более высоких порядков обладают более высокой расходимостью [3], формируемый пучок близок к одномодовому.

Были рассчитаны и изготовлены элементы, предназначенные для формирования мод Гаусса–Эрмита (1,0), Гаусса–Эрмита (1,1) и Гаусса–Лагерра (2,2) со следующими параметрами: рабочая длина волны – 141 мкм, апертура – 30 мм (для моды Гаусса–Эрмита (1,0)), 38 мм (для моды Гаусса–Лагерра (2,2) и моды Гаусса–Эрмита (1,1)), радиус модового пучка формируемой моды Гаусса–Лагерра (2,2) 5 мм, шаг дискретизации выбирался равным 25×25 мкм и 50×50 мкм.

Рассчитанные бинарные фазовые функции элементов приведены на рис. 1.

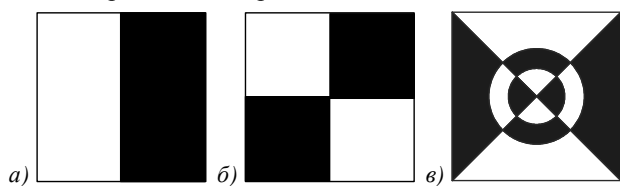


Рис. 1. Фазовые функции элементов (белый цвет соответствует значению фазы π , чёрный цвет – 0), формирующих модовые пучки Гаусса–Эрмита (1,0) (а), Гаусса–Эрмита (1,1) (б) и Гаусса–Лагерра (2,2) (в)

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 $h = 29,1$ мкм.

2. Контроль геометрических параметров микрорельефа

Контроль геометрических параметров получаемых ДОЭ осуществлялся методами интерферометрии бе-

лого света с помощью интерферометра WLI-DMR (производство Института Фраунгофера, г. Йена, Германия) и средствами растровой электронной микроскопии с помощью электронного микроскопа Quanta-200 (FEI). Электронная фотография изготовленного элемента, предназначенного для формирования моды Гаусса–Лагерра (2,2), приведена на рис. 2.

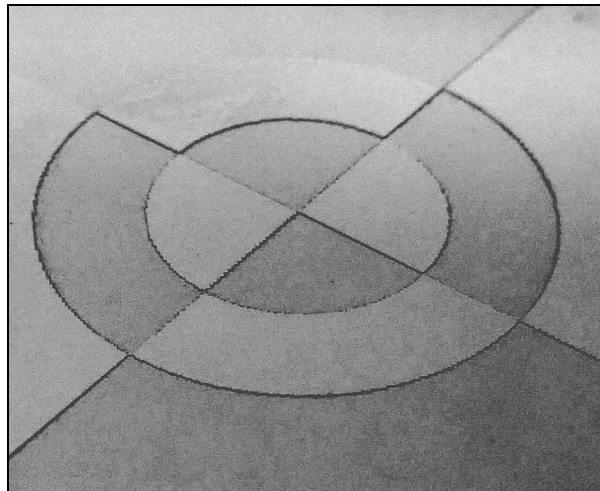


Рис. 2. Электронная фотография изготовленного элемента для формирования моды Гаусса–Лагерра (2,2)

Интерферометрия использовалась как экспресс-средство контроля глубины протравы и качества дна (рис. 3). Электронная микроскопия использовалась для оценки качества стенок, дна и определения геометрических размеров получаемых элементов микрорельефа.

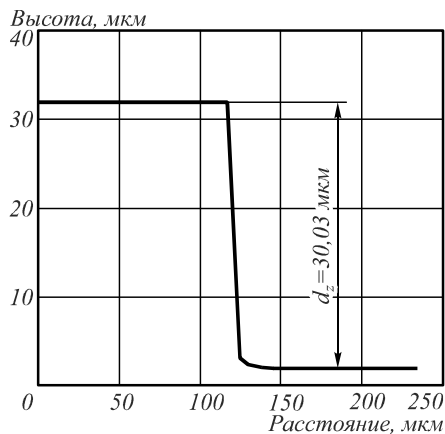


Рис. 3. Профиллограмма изготовленного микрорельефа (стрелкой показана высота рельефа)

3. Исследование элементов с помощью Новосибирского лазера на свободных электронах

Оптические характеристики изготовленного ДОЭ были исследованы на одной из рабочих станций Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Оптическая схема, использованная для измерения распределения интенсивности в различных плоскостях, приведена на рис. 4. Исходный лазерный пучок имел гауссовское распределение интенсивности. Средняя мощность излучения в экспериментах составляла десятки Ватт.

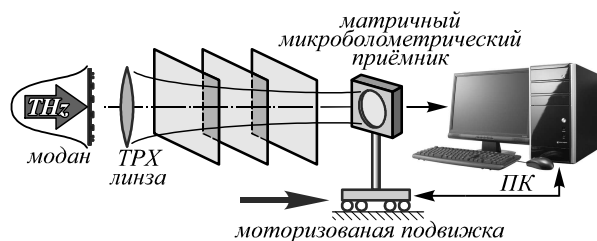


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента по измерению распределения интенсивности в сечении сформированного пучка

Эксперименты были проведены при длине волны излучения ЛСЭ $\lambda = 141$ мкм. Прошедшее сквозь элемент излучение фокусировалось с помощью TRX (полимер Poly(4-methyl pentene-1)) линзы с $f = 200$ мм и регистрировалось с помощью матричного болометрического приёмника размером 320×240 элементов [11], перемещающегося вдоль оптической оси.

Для исследования фазовой структуры сформированных модовых пучков использовалась оптическая схема, приведённая на рис. 5. Модан был установлен в одно из плеч интерферометра Маха–Цендера. Для записи интерферограмм использовалась комбинация термочувствительного люминесцентного экрана (ТЧЛЭ) из набора экранов Masken Instruments, Inc и камеры видимого диапазона. Люминесцентный экран, освещаемый ртутной лампой, люминесцировал в оранжевой области спектра. Падающее терагерцовое излучение нагревало экспонируемые области экрана, и интенсивность люминесценции в нагретых областях падала пропорционально росту локальной температуры. Люминесцентный экран имеет относительно низкую чувствительность к терагерцовому излучению, но размер экрана 76×76 мм позволяет записать полную дифракционную картину.

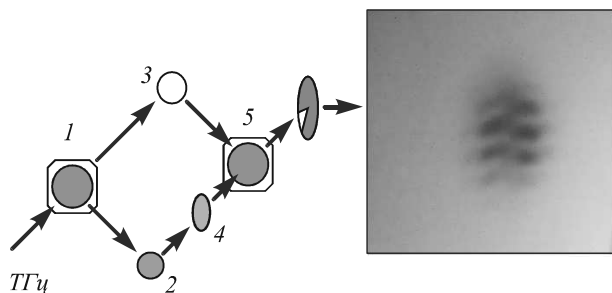


Рис. 5. Оптическая схема эксперимента по исследованию фазы сформированных модовых пучков методом интерферометрии (1, 5 – плёночные делители пучка из полипропилена, 2, 3 – зеркала, 4 – модан). Интерферограмма получена с помощью ТЧЛЭ и фотокамеры

4. Результаты экспериментов

Эталонные распределения формируемых мод представлены на рис. 6.

Результаты измерений распределений интенсивности мод Гаусса–Эрмита (1,1) и Гаусса–Лагерра (2,2), проведённых по схеме на рис. 4, для расстояний между TRX линзой и приёмником, соответствующих: а) 80 мм, б) 84 мм, в) 88 мм, г) 92 мм, д) 96 мм, е) 100 мм, представлены на рис. 7 и рис. 8.

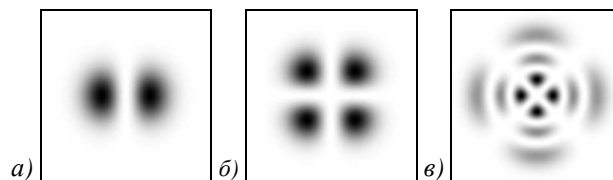


Рис. 6. Эталонные распределения интенсивности мод а) Гаусса–Эрмита (1,0), б) Гаусса–Эрмита (1,1) и в) Гаусса–Лагерра (2,2)

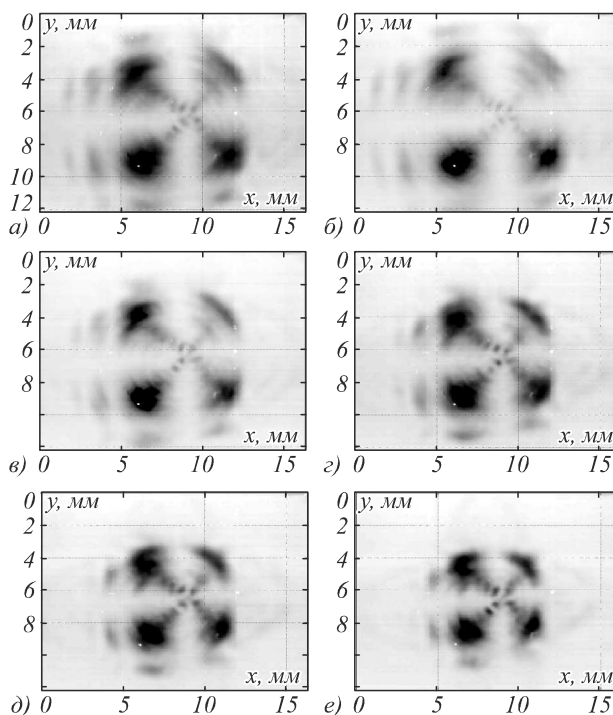


Рис. 7. Измеренное распределение интенсивности сформированного одномодового пучка Гаусса–Эрмита (1,1) в плоскостях, отстоящих от TRX линзы на расстояние: а) 80 мм, б) 84 мм, в) 88 мм, г) 92 мм, д) 96 мм, е) 100 мм

В экспериментах использовался Гауссов пучок с модовым радиусом около 10 мм. Расчётные распределения интенсивности в соответствующих сечениях пучка, полученного освещением бинарного модана исходным Гауссовым пучком лазера с плоским волновым фронтом, представлены на рис. 9–10.

На рис. 11 приведены результаты исследования фазовой структуры одномодового пучка Гаусса–Эрмита (1,0), сформированного с помощью элемента с фазовой функцией (рис. 1а). Сдвиг полос на интерферограмме (рис. 11б) соответствует фазовому сдвигу между двумя «долями» (рис. 6а) в сечении моды Гаусса–Эрмита (1,0) на величину, близкую к π .

Результаты эксперимента демонстрируют сохранение амплитудно-фазовой структуры сформированных пучков при их распространении в пространстве и качественно соответствуют результатам численного моделирования. Имеющиеся отличия от расчётных распределений объясняются, по-видимому, отличиями освещающего пучка в плоскости установки элемента от плоского Гауссова пучка.

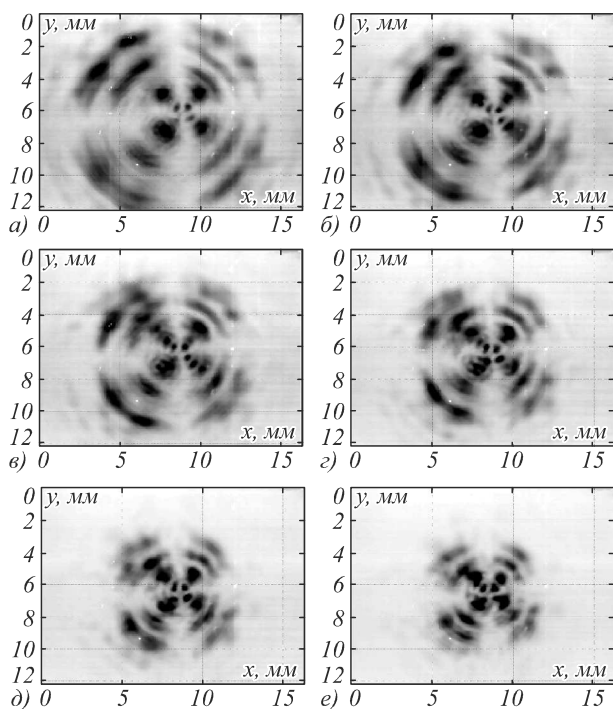


Рис. 8. Измеренное распределение интенсивности сформированного одномодового пучка Гаусса–Лагерра (2,2) в плоскостях, отстоящих от ТРХ линзы на расстояние: а) 80 мм, б) 84 мм, в) 88 мм, г) 92 мм, д) 96 мм, е) 100 мм

Заключение

Эксперименты показали принципиальную возможность применения бинарных дифракционных элементов для формирования Гауссовых мод из пучка терагерцового излучения лазера на свободных электронах. Повысить качество формирования заданного распределения в сечении формируемого модового пучка можно с помощью обобщённого метода кодирования Кирка–Джонса, рассмотренного, например, в [3].

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и гранта РФФИ 13-02-97007, с использованием оборудования Центра коллективного пользования Сибирский Центр синхротронного и терагерцового излучения (ЦКП СЦСТИ).

Литература

1. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, С.Н. Хонина. – Под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
2. Голуб, М.А. Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский, А.В. Мирзов, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, Г.В. Уваров // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15, № 3. – С. 617-618.
3. Soifer, V.A. Laser beam mode selection by computer generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub. – CRC Press, 1994.
4. Knyazev, V.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / V.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
5. Агафонов, А.Н. Дифракционные линзы для мощных пучков терагерцового излучения / А. Н. Агафонов, М. Г. Вла-

сенко, Б.О. Володкин, В.В. Герасимов, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, И.Г. Пальчикова, В.А. Соифер, М.Ф. Ступак, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Ю.Ю. Чопорова // Известия РАН, Серия физическая. – 2013. – Т. 77, № 9. – С. 1360-1362.

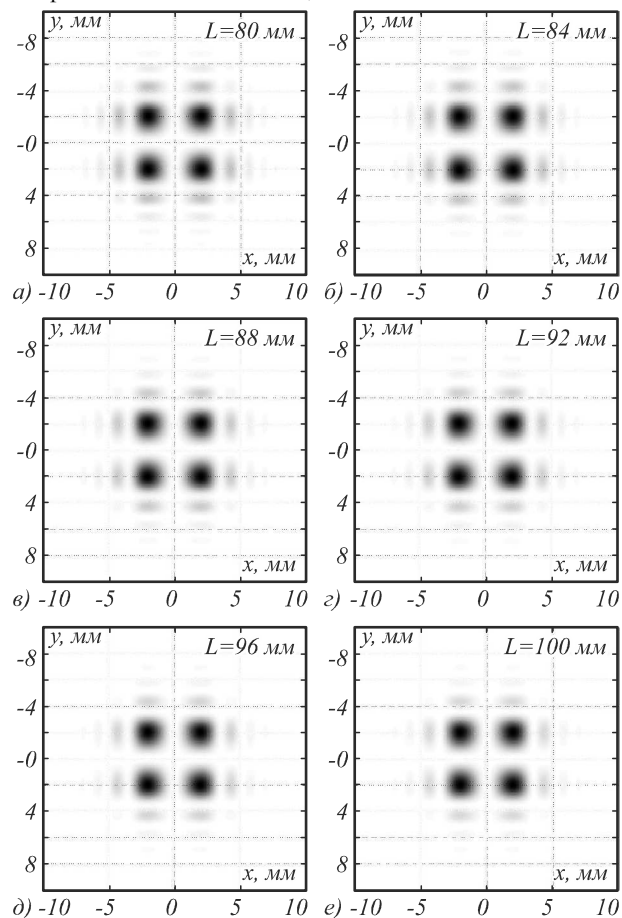


Рис. 9. Расчётное распределение интенсивности сформированного одномодового пучка Гаусса–Эрмита (1,1) в плоскостях, отстоящих от ТРХ линзы на расстояние: а) 80 мм, б) 84 мм, в) 88 мм, г) 92 мм, д) 96 мм, е) 100 мм

6. 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. Соифер, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Ю.Ю. Чопорова // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 98-105.
7. Агафонов, А.Н. Кремниевая оптика для фокусировки лазерного излучения терагерцового диапазона в заданные двумерные области / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, С.Г. Волоотовский, 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.
8. Miyamoto, K. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate / K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, T. Omatsu // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104(26). – P. 261104.
9. Reiten, M.T. Terahertz beam propagation measured through three-dimensional amplitude profile determination / M.T. Reiten, S.A. Harmon, R.A. Cheville // JOSA B – 2003. – Vol. 20, Issue 10. – P. 2215-2225.
10. Silicon [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tydex-optics.com/pdf/Si.pdf> (дата обращения 02.09.2014).
11. 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.

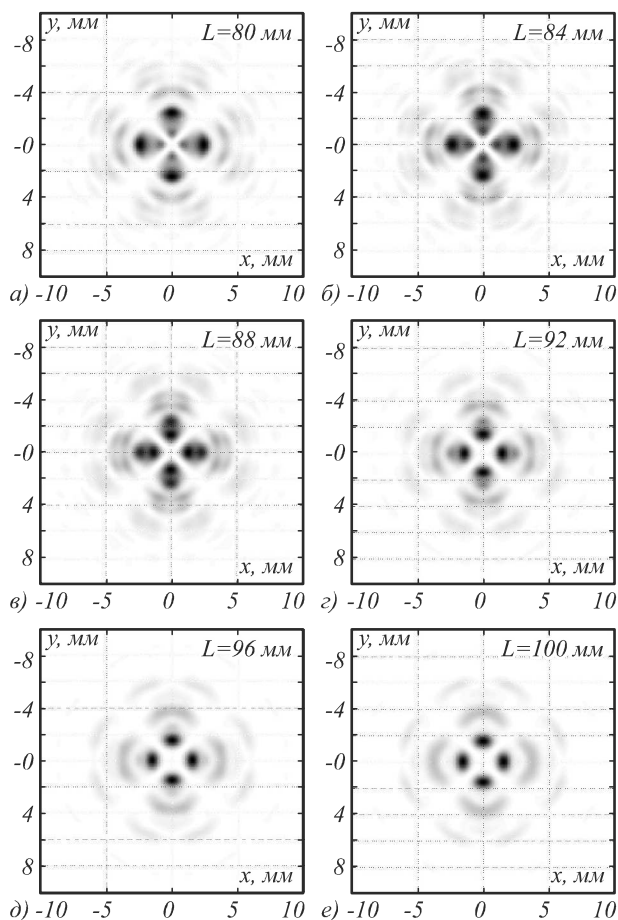


Рис. 10. Расчётное распределение интенсивности сформированного одномодового пучка Гаусса–Лагерра (2,2) в плоскостях, отстоящих от ТРХ линзы на расстояния: а) 80 мм, б) 84 мм, в) 88 мм, г) 92 мм, д) 96 мм, е) 100 мм

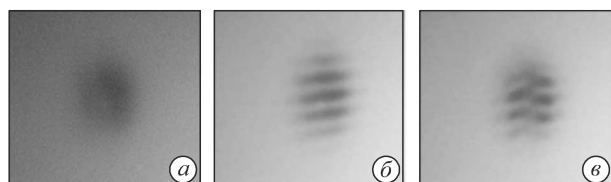


Рис. 11. Результаты исследования фазовой структуры сформированного одномодового пучка. а – опорный пучок, б – интерференция двух Гауссовых пучков, в – интерференция Гауссова пучка и одномодового пучка Гаусса–Эрмита (1,0)

References

1. Computer design of diffractive optics / D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, S.N. Khonina. – Ed. by V.A. Soifer. – Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.
2. **Golub, M.A.** Phase spatial filters matched to transverse modes / M.A. Golub, S.V. Karpeyev, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // Quantum Electronics. – 1988. – Vol. 5(3). – P. 617.
3. **Soifer, V.A.** Laser beam mode selection by computer generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub. – CRC Press, 1994. – P. 617-618.
4. **Knyazev, B.A.** Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
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(9). – P. 1164-1166.
6. **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(2). – P. 189-195.
7. **Agafonov, A.N.** 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. Tukmakov, V.S. Pavelyev, E.V. Tsygankova, D.I. Tsypishka, Yu.Yu. Choporova // Computer Optics. – 2013. – Vol. 37(4). – P. 464-470. – ISSN 0134-2452.
8. **Miyamoto, K.** Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate / K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, T. Omatsu // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104(26). – P. 261104.
9. **Reiten, M.T.** Terahertz beam propagation measured through three-dimensional amplitude profile determination / M.T. Reiten, S.A. Harmon, R.A. Cheville // JOSA B. – 2003. – Vol. 20(10). – P. 2215-2225.
10. Silicon [Electronical Resource]. – URL: <http://www.tydex-optics.com/pdf/Si.pdf> (request date 02.09.2014)f
11. **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.

CONTROL OF TRANSVERSE MODAL SPECTRUM OF TERAHERTZ LASER IRRADIATION BY BINARY SILICON OPTICAL ELEMENTS

A.N. Agafonov¹, B.O. Volodkin¹, A.K. Kaveev², B.A. Knyazev^{3,4}, G.I. Kropotov², V.S. Pavelyev^{1,5}, K.N. Tukmakov¹, 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 Science

Abstract

Experimental results on forming pre-given laser modes from an illuminating Gaussian beam of a terahertz Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) at the wavelength of 141 μm by use of bi-

nary silicon diffractive optical elements are presented. The experimental results are in good agreement with the results of computer simulation.

Key words: 050.1970 Diffractive optics, 140.2600 Free-electron lasers, terahertz radiation, 140.3570 Lasers, single-mode

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-, 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.

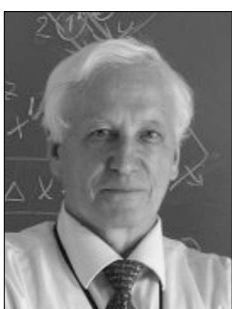
Boris Olegovich Volodkin, engineer of Nanoengineering department, vice-director of REC “Nanotechnology” of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University). Areas of research: technology of micro- and nanostructures, scanning probe microscopy, polymer systems.



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



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 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: fabrication of micro-and nanostructures, technology of focused ion beams.



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 at 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 9 сентября 2014 г.