



УДК 535.421: 681.7

Е.Л. Бубис<sup>1</sup>, В.В. Ложкарев<sup>1</sup>, А.Н. Степанов<sup>1,3</sup>, А.И. Смирнов<sup>1,3</sup>, В.О. Мартынов<sup>1</sup>,  
С.А. Гусев<sup>2,3</sup>, Е.В. Скороходов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, 603950, г. Нижний Новгород, Россия,  
Ульянова ул., 46, E-mail: bel@appl.sci-nnov.ru*

<sup>2</sup> *Институт физики микроструктур РАН, 603087, г. Нижний Новгород, Россия,  
Академическая ул. д. 7, E-mail: gusev@ipm.sci-nnov.ru*

<sup>3</sup> *ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, г. Нижний Новгород, Россия,  
пр. Гагарина 23, gusev@ipm.sci-nnov.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ФАЗОКОНТРАСТНОЙ СХЕМЕ С АДАПТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ НА ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Рассмотрены процессы самоинвертирования и визуализации мелкомасштабных объектов и структур в фазоконтрастной схеме с адаптивным фильтром на нелокальной тепловой нелинейности. Показано, что несмотря на нелокальность процесса, инвертированное по яркости изображение обладает приемлемым качеством и высоким коэффициентом преобразования. Показано, что зависимость коэффициента преобразования изображения оригинала в инвертированное изображение зависит от соотношения его размеров к размеру освещающего пучка. Полученные экспериментальные результаты находятся в согласии с численными расчетами.

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, САМОИНВЕРТИРОВАНИЕ, ФАЗОКОНТРАСТНАЯ СХЕМА,  
АДАПТИВНЫЙ ФИЛЬТР**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Теневые и фазоконтрастные методы с применением адаптивных нелинейных фильтров (транспарантов) широко используются для регистрации неоднородности среды, в частности, газовых потоков [1 – 4]. В данной работе приведены результаты исследований формирования изображения в фазоконтрастной схеме с адаптивным фильтром расположенным в Фурье- плоскости оптической системы на тепловом механизме нелинейности [4 – 9]. Рассмотрены случаи оптически тонкой и длинной сред нелинейных фильтров, прозрачных и частично прозрачных исследуемых объектов. Учтена нелокальность процесса прогрева среды фильтра. Рассмотрены также процессы инверсии.

При численных расчетах стационарное радиальное распределение температуры в изотропной среде фильтра при непрерывном освещении определялось из уравнением теплопроводности. Далее используя дифракционный интеграл Френеля-Кирхгофа в парааксиальном приближении рассчитывалось распределение интенсивности для модельных объектов в плоскости их изображения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В эксперименте для освещения объектов использовался одномодовый по поперечной структуре лазер мощностью менее 3 мВт и длиной волны 0,53 мкм. Использовались окрашенные спирт и ацетон, а также цветной плексиглас в качестве рабочей среды фильтров.

На рис. 1 представлены фотографии: а) визуализация газового микропотока (численное моделирование) в случае оптически толстой среды фильтра (диаметр освещающего пучка 1 см, размер газового микропотока 2 мм, величина фазовой модуляции 0.1); б, в) микрофотографии прямого и инвертированного изображения (эксперимент), полученных при данном процессе, места работы (институтов) авторов данной статьи. Ширина линии букв 4 мкм.

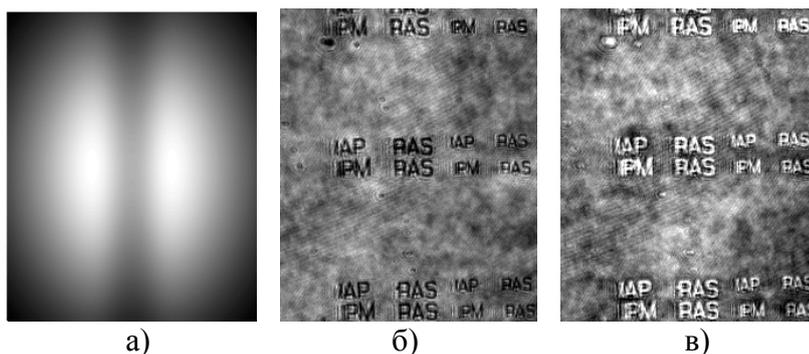


Рис.1.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При численных расчетах рассматривался случай переноса изображения из двойного фокуса в двойной. Анализ производился аналогично [13]. Для расчета выходного поля использовался дифракционный интеграл Френеля-Кирхгофа в параксиальном приближении. В расчетах предполагалось, что исследуемый непрозрачный объект освещается лазерным пучком с гауссовым профилем интенсивности и плоским волновым фронтом (рис. 1). В фокальной плоскости объектива размещался фототермический фильтр Цернике. Часть излучения поглощалась в ячейке, приводя к ее неоднородному нагреву. Ячейка рассматривалась в виде цилиндра, отвод тепла в котором осуществлялся в радиальном направлении. Радиальное стационарное распределение температуры в ячейке находилось из решения уравнения теплопроводности, которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = - \frac{2\alpha P_{in}}{\pi K w_f^2} \exp \left\{ - \frac{2r^2}{w_f^2} \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент линейного поглощения,  $P_{in}$  – мощность падающего на ячейку излучения,  $K$  – коэффициент теплопроводности,  $w_f$  – радиус (по уровню  $e^{-2}$ ) гауссова пучка. Решение (1) при граничных условиях  $T(r = r_0) = 0$  имеет вид [13, 17]:

$$T(r) = T(0) \left[ 1 - \frac{E_1(x) + \ln(x) + \gamma}{E_1(x_0) + \ln(x_0) + \gamma} \right], \quad (2)$$

в котором  $r_0$  – радиус ячейки Цернике,  $E_1(x)$  – интегрально-показательная функция,  $\gamma = 0,577\dots$  – постоянная Эйлера,

$$x = \frac{2r^2}{w_f^2}, x_0 = \frac{2r_0^2}{w_f^2}, T(0) = \frac{\alpha P_{in}}{4\pi K} [E_1(x_0) + \ln(x_0) + \gamma] . \quad (3)$$

Вследствие неоднородного нагрева ячейки в ней формируется неоднородный профиль показателя преломления  $n$ , приводящий к расфазировке пространственных частот и визуализации изображения прозрачного объекта при  $\Delta\varphi \cong \pi/2$ , а при фазовом сдвиге  $\Delta\varphi \cong \pi$  – инверсии непрозрачного объекта (это справедливо в линейном локальном случае. Для фототермических процессов, ввиду того, что в процессе участвуют практически все пространственные гармоники, требуемые эквивалентные сдвиги, как правило, немного выше [13]). Из распределения температуры  $T(r)$  и, соответственно, вносимой ячейкой в пучок разности фаз  $\Delta\varphi(r)$  с использованием дифракционного интеграла рассчитывалось распределение интенсивности амплитудных объектов в плоскости их изображения. Размер счетной сетки был  $2048 \times 2048$ . Предполагалось, что линза  $L$  имеет безграничную апертуру. Размер падающего пучка  $w_f = 2,8$  см, размер фильтра Цернике 1 см. Фокусное расстояние линзы 15 см.

На рис. 2 представлены численные расчеты инверсии изображения амплитудных объектов разной ширины, откуда следует, что процесс высоким коэффициентом преобразования имеет место только для мелкомасштабных, по отношению к зондирующему пучку, объектов. Это условие хорошо выполнялось для используемой в эксперименте непрозрачной сетки на стеклянной подложке. Размеры объектов в численных расчетах были от 0,8 см до 200 мкм. Изображение на рис. 2 не нормировано.

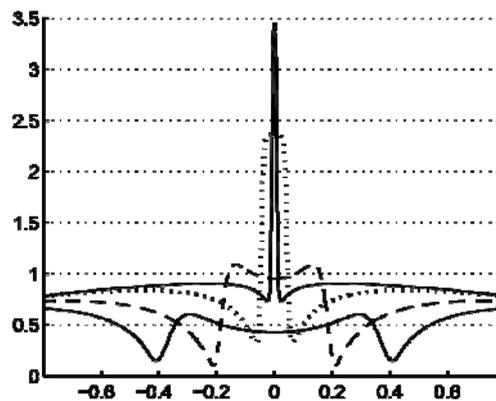


Рис. 2. Инверсия изображения амплитудных объектов разной ширины

Отметим, что процесс инверсии непрозрачных объектов, так же, как и визуализации прозрачных, сопровождаются определенными искажениями, отличающихся для объектов с разными степенями гладкости. На рис. 3 представлены результаты численных расчетов инверсии объектов с прямоугольной и гауссовой функциями. Изображение нормировано на падающий пучок. Объекты имеют ширину 200 мкм. На рис. 3 видны различия в качестве инвертированного изображения, которые связаны с отличием в их пространственных спектрах.

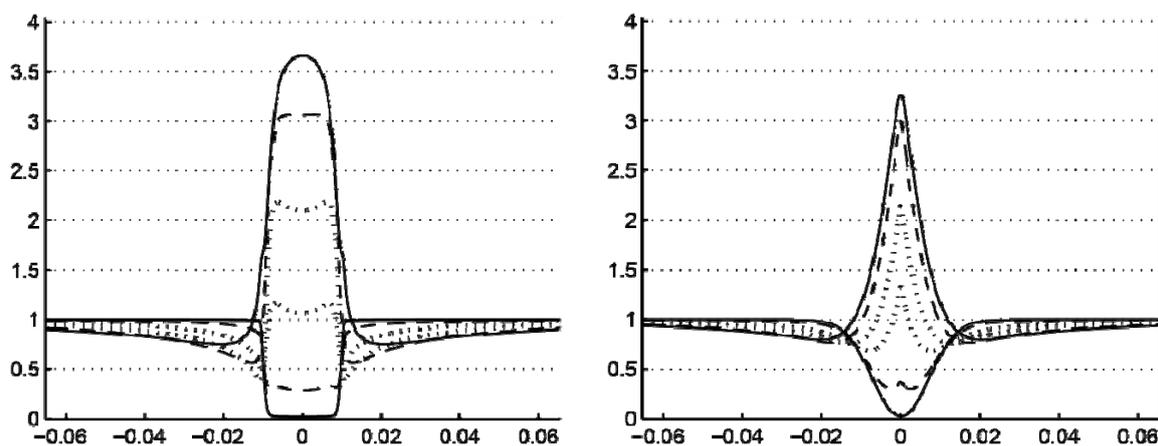


Рис. 3. а) step – образный непрозрачный объект; б) непрозрачный объект гауссовой формы. Сплошная линия – фазовый сдвиг  $\theta = 0,1\pi$ ; штрихованная  $0,4\pi$ ; пунктирная  $0,8\pi$ ; пунктирная  $1,2\pi$ ; штрихованная  $1,6\pi$ ; сплошная  $2,0\pi$

Отметим, что имеющее место действительное распределение температуры в среде может не совпадать с данным, взятом, при данных граничных условиях, но полученные результаты укладываются в рамки принятой модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что инверсия и визуализация изображения мелкомасштабных объектов в данных схемах происходит достаточно эффективно и процессы могут быть использованы для коррекции и преобразования изображения исследуемых, в том числе и прозрачных, структур.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изготовление и исследование структур проводилось на оборудовании ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

Работа частично поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку работы (грант № 15-02-08212).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В.** Методы оптической диагностики в аэрофизической эксперименте Новосибирск: НГУ, 2009. 450с.
2. **Чернега Н.В., Бреховских Г.Л., Кудрявцева А.Д.** и др. Преобразование амплитудно-фазовых характеристик сфокусированного лазерного излучения с помощью нелинейно-оптических явлений в ацетоне и жидком азоте // Квант.электр,16,1989. 2530 р.
3. **Komorowska K.** et al. Self-induced nonlinear Zernike filter realized with optically addressed liquid crystal spatial light modulator // J.of Appl.Phys., 2002. 92, 5635.
4. **Trevino-Palacios C.G., Iturbe-Castillo M.D., Sanchez-de-la-Llave D.**, et al. Nonlinear common-path interferometer: an image processor // Appl. Opt. 2003. №. 25. P. 5091-5095.

5. **Бубис Е.Л., Гусев С.А.** Визуализация прозрачных объектов и структур методом фазового контраста с фототермической ячейкой Цернике // Труды X Юбилейной международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (ОМИП-2009, ОМФИ-2009), / Под ред. Ю.Н. Дубнищева, Б.С. Ринкевичюса. - Москва, Издательский дом МЭИ, 2009, С. 518-519.
6. **Bubis E.L.** The effect of phase object imaging in focusing of spatially phase-modulated laser beams on a weakly absorbing extended medium // Proceedings of the SPIE, 2010. V. 7994. P. 69941I-79941I-6.
7. **Бубис Е.Л.** Эффект самовизуализации прозрачных объектов и структур при фокусировке пространственно-фазомодулированного лазерного излучения в слабопоглощающую среду // Квантовая электроника, 2011. Т. 41. № 6. С. 568-570.
7. **Бубис Е.Л., Матвеев А.З.** Анализ процесса визуализации прозрачных объектов при использовании фазоконтрастного метода с фототермической ячейкой Цернике // Квантовая электроника, 2012. Т. 42. № 4. С. 361-366.
8. **Бубис Е.Л., Гусев С.А., Кожеватов И.Е., Мартынов В.О., Степанов А.Н.** К применению адаптивного фазоконтрастного метода с нелинейными фильтрами. // Успехи прикладной физики 2013, Т. 1. № 4. С. 408-409.
9. **Бубис Е.Л., Гусев С.А., Ложкарев В.В., Мартынов В.О., Силин Д.Е., Степанов А.Н.** Метод получения инвертированного изображения // Приборы и техника эксперимента, 2014. № 5. С. 113-114.

E.L.Bubis<sup>1</sup>, V.V.Lozhkarev<sup>1</sup>, AN Stepanov<sup>1,3</sup>, A.I.Smirnov<sup>1,3</sup>, VO Martynov<sup>1</sup>,  
S.A.Gusev<sup>2,3</sup>, Skorohodov E.V<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics RAS, Russia, 603950, Nizhny Novgorod, 46 Ul'yanov Street,  
E-mail: bel@appl.sci-nnov.ru*

<sup>2</sup>*The Institute for Physics of Microstructures RAS, Russia, 603087, Nizhny Novgorod, E-mail: gusev@ipm.sci-nnov.ru*

<sup>3</sup>*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 603950, Gagarin Street, 23,  
E-mail: step@appl.sci-nnov.ru*

#### STUDY OF IMAGE FORMATION IN PHASE CONTRAST SCHEME WITH ADAPTIVE FILTER ON THE THERMAL NONLINEARITY

*Self-inversion and self-visualization of small-scale objects and structures in phase contrast scheme with an adaptive filter with nonlocal thermal nonlinearity considered. It is shown that despite the nonlocal process inverted image of acceptable quality and high conversion efficiency. It is shown that the dependence of the conversion of the original image in the inverted image depends on the ratio of its size to the size of the illuminating beam. The experimental results are in good agreement with numerical calculations.*