

УДК 535.8:535.1:535.548

## К детектированию неоднородностей среды методом фазового контраста с фототермической ячейкой Цернике

Е. Л. Бубис, С. А. Гусев, И. Е. Кожеватов, В. О. Мартынов, Ю. А. Мамаев, А. С. Сергеев

*Рассмотрены некоторые вопросы детектирования неоднородности среды методом фазового контраста с фототермической ячейкой Цернике. Результаты численного моделирования показали, что усиление краев в визуализированном изображении методом фазового контраста с фототермической ячейкой зависит от распределения температуры в среде. Исследован процесс визуализации в оптически тонкой и длинных фототермических ячейках. Рассмотрено использование тонкопленочной твердотельной ячейки с продольным теплоотводом в фазоконтрастных схемах с меньшим уровнем искажений изображения.*

PACS: 07.60.-j

*Ключевые слова:* метод фазового контраста, фототермическая ячейка Цернике.

### Введение

Фазоконтрастный метод используется для детектирования неоднородностей среды [1—5]. В этом методе для линейного преобразования фазовой модуляции, вносимой исследуемой структурой в зондирующий лазерный пучок, в амплитудную, в фокальной плоскости объектива (Фурье-плоскости) устанавливается маленький фазовый экран (фильтр Цернике), вносящий селективный сдвиг  $\theta = \pm \pi/2$  между нулевой и высшими пространственными частотами, требующий тщательной юстировки. В последнее время стали применяться фазоконтрастные схемы, использующие нелинейные фильтры Цернике.

По сравнению со схемами, использующими традиционные линейные ячейки Цернике, схемы нелинейного фазового контраста [5—12] в существенно меньшей степени нуждаются в настройке, менее подвержены вибрациям, легко перестраиваемы, а требуемый сдвиг фаз достигается путем

выбора соответствующей интенсивности света, поступающего в нелинейную среду. Визуализация прозрачных структур реализована в схемах с нелинейными фильтрами Цернике на основе фоторефрактивных, жидких кристаллов, пленок бактериородопсина в слабощных лазерных пучках. В работе описана фазоконтрастная схема, использующая поглощающую ячейку в качестве фототермического фильтра на тепловой нелинейности [7—11], которая может быть использована в системах диагностики плазмы, подобно [2—4]. Важно отметить, что тепловая нелинейность, по-видимому, является оптимальной, на которой могут быть построены нелинейные ячейки Цернике при мощностях в десятки ватт, использующихся в линейных схемах [2—4]. Насколько известно авторам, в литературе такие вопросы не рассматривались.

### Расчет качества изображения визуализированных объектов

В фазоконтрастной схеме при наличии фазового объекта, вносящий в плоскую волну слабый фазовый сдвиг  $\varphi(x, y) < 1$ , распределение интенсивности света в плоскости изображения при сдвиге фаз  $\Theta$  между нулевой и высшими пространственными частотами имеет вид

$$I_{out} \propto [1 + 2\varphi(x, y) \sin \Theta]. \quad (1)$$

Фазовый сдвиг  $\Theta$  в случае использования нелинейных фильтров создается в кубично нелинейной среде и в нашем случае, вследствие ее нагрева сильной нулевой гармоникой. В эксперименте и в расчетах нами использовалась однолинзовая схема формирования изображения с фототермической ячейкой, расположенной в фокусе объектива. Распределение температуры в изотропной среде при непрерывном освещении определяется уравнени-

---

**Бубис Евгений Львович**, старший научный сотрудник.  
**Мамаев Юрий Анатольевич**, заведующий лабораторией.  
**Мартынов Виталий Олегович**, магистрант.  
**Сергеев Александр Сергеевич**, ведущий научный сотрудник.  
 Институт прикладной физики РАН.  
 Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.  
 E-mail: bel@appl.sci-nnov.ru  
**Гусев Сергей Александрович**, ведущий научный сотрудник.  
 Институт физики микроструктур РАН.  
 Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105.  
 E-mail: gusev@ipm.sci-nnov.ru  
**Кожеватов Илья Емельянович**, заведующий лабораторией.  
 Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ).  
 Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25.  
 E-mail: kozhevatomv@nirfi.sci-nnov.ru

Статья поступила в редакцию 20 марта 2012 г.

© Бубис Е. Л., Гусев С. А., Кожеватов И. Е., Мартынов В. О., Мамаев Ю. А., Сергеев А. С., 2012

ем теплопроводности. В случае слабого поглощения и чисто радиального отвода тепла в цилиндрической системе координат уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{2\alpha P}{\pi w^2 k} \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right) = 0, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного поглощения;  
 $P$  — мощность падающего на фототермический фильтр излучения;  
 $k$  — коэффициент теплопроводности;  
 $w$  — радиус (по уровню  $e^{-2}$ ) гауссова пучка в фокусе.

Уравнение (2) при граничных условиях  $T(r=r_0) = 0$  имеет строгое решение [11—14]:

$$T(r) = T(0) \left[ 1 - \frac{E_1(x) + \ln(x) + \gamma}{E_1(x_0) + \ln(x_0) + \gamma} \right], \quad (3)$$

в котором  $r_0$  — радиус ячейки Цернике,  $E_1(x)$  — интегрально-показательная функция,  $\gamma = 0,577$  — постоянная Эйлера. Введены также обозначения

$$x = \frac{2r^2}{w^2}, \quad x_0 = \frac{2r_0^2}{w^2}, \quad T(0) = \frac{\alpha P}{4\pi k} [E_1(x_0) + \ln(x_0) + \gamma].$$

Зная распределение температуры  $T(r)$  и, соответственно, вносимую ячейкой Цернике в пучок разность фаз  $\Delta\varphi(r)$ , и используя дифракционный интеграл, рассчитывалось распределение интенсивности простых фазовых объектов в плоскости их изображения. Распределение температуры в тонкой пластинке в случае чисто продольного отвода тепла определяется уравнением:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{2\alpha P}{\pi w^2 k} \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right) = 0. \quad (4)$$

Решение (4) для случая, когда одна сторона пластинки (фильтра) теплоизолирована, а другая поддерживается при постоянной температуре  $T_0$ , имеет вид:

$$T = T_0 + \frac{\alpha P}{\pi w^2 k} (l^2 - z^2) \exp\left(\frac{-2r^2}{w_0^2}\right),$$

где  $l$  — толщина фильтра.

Для более точного расчета температуры в последнем случае, при необходимости, можно воспользоваться методом для определения потерь в плазменном столбе с учетом боковых потерь ([15] и имеющиеся там ссылки). При чисто продольном теплоотводе фототермический фильтр ведет себя подобно фильтру Цернике на основе локальной керровской нелинейности. При расчете процесса визуализации рассматривался случай переноса

изображения из  $2f$  в  $2f$  аналогично [11]. Для расчета выходного поля использовался дифракционный интеграл Френеля—Кирхгофа в параксиальном приближении.

На рис. 1 представлены результаты моделирования процесса визуализации: *a* — синусоидального фазового объекта; *b* — фазовой полоски толщиной 1 мм и глубиной фазовой модуляции  $0,1\pi$  при освещении пучком 2 см и использовании разных фазовых корректоров: пунктирная линия — тепловая ячейка Цернике с чисто поперечным теплоотводом, штрихованная линия — тепловая ячейка Цернике с чисто продольным теплоотводом, сплошная линия — сдвиг фазы вызван при отражении от термдеформированной поверхности диэлектрика [16—19]. Результат нормирован на падающий пучок. Видно, что результаты искажений зависят от геометрии нагрева и более предпочтительна геометрия с продольным теплоотводом, приводящая к существенно меньшим искажениям.

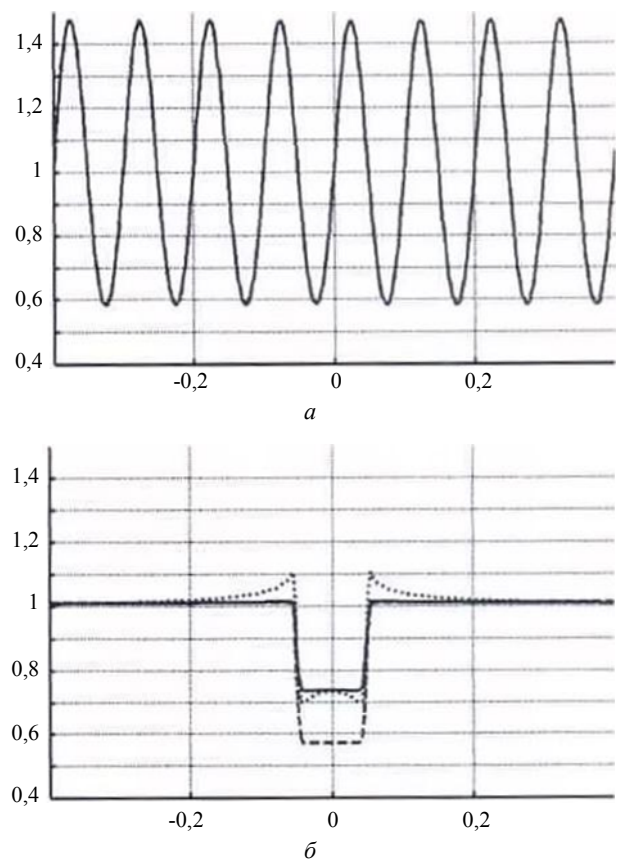


Рис. 1. Численное моделирование процесса визуализации: *a* — синусоидального фазового объекта; *b* — фазовой полоски толщиной 1 мм

### Эксперимент

Для демонстрации возможностей метода в данной статье приводятся визуализированные изображения некоторых прозрачных объектов и структур. В экспериментах в качестве освещаю-

щего источника использовались одномодовые по поперечной структуре лазеры. Визуализированные изображения прозрачных объектов фотографировались на экране, расположенном в плоскости изображения объекта, или без экрана с помощью ПЗС-камеры [16]. На рис. 2, *а* представлены визуализированные изображения стоячей ультразвуковой волны, возбуждаемой в воде на частоте 2,5 МГц. На рис. 2, *б* приведено визуализированное изображение тонкого слабого стеклянного клина, внесенного в пучок лазера. Видны интерференционные полосы, получаемые в традиционных интерферометрах. На рис. 2, *в* приведено изображение визуализированного прозрачного микрообъекта — "Фурье оптика". Он был сформирован методом электронно-лучевой литографии в пленке позитивного электронного резиста ПММА, нанесенного на кварцевую подложку. Для этого была использована литографическая приставка ELPHY Plus, установленная на электронном микроскопе SUPRA 50VP. Толщина линии букв — 10 мкм.

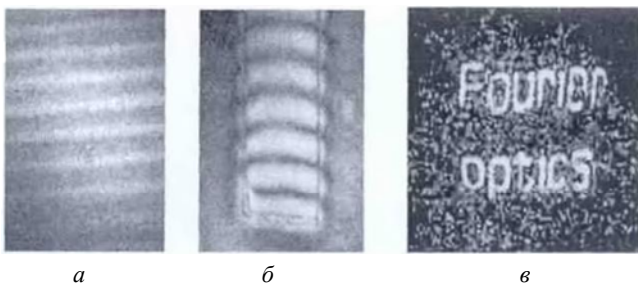


Рис. 2 Визуализированные изображения прозрачных объектов:

*а* — стоячей ультразвуковой волны; *б* — тонкого стеклянного клина; *в* — прозрачного микрообъекта

Ввиду важности устойчивости схемы был проведен эксперимент по исследованию сигнала с фотоприемника объекта в виде фазовой полоски при смещении фототермического фильтра из Фурье-плоскости (рис. 3).

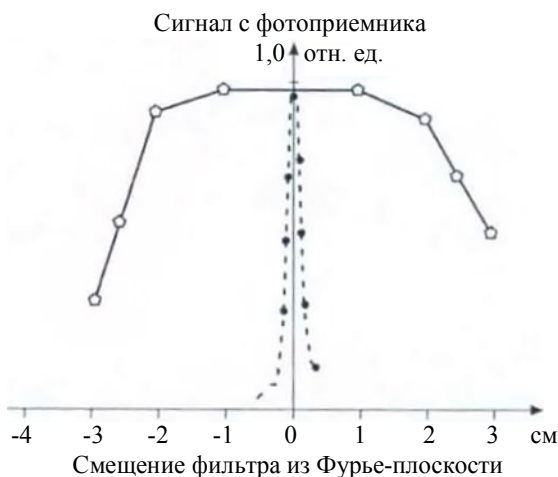


Рис. 3. Качество визуализации при выдвигании фильтра из Фурье-плоскости

Штрихованная линия соответствует оптически тонкой среде (1 мм) фототермического фильтра, а сплошная — оптически толстой (6 см). Видно, что оптически толстая среда более предпочтительна, хотя требует более прозрачных сред и, следовательно, необходима несколько более высокая мощность освещающего объект лазерного пучка, что следует из (2). Подобная изображенной на рис. 2, *б* визуализация фазового объекта была получена и с использованием вспомогательного пучка в прозрачной среде для основного пучка. В данном случае теряется адаптивность метода, но демонстрируется простая возможность осуществления сдвига фаз, необходимая в фазоконтрастных схемах для измерения слабого поглощения в среде [17].

### Заключение

Необходимо отметить, что при применении лазерного излучения в ИК-диапазоне может быть использована тепловая нелинейность для осуществления сдвига фаз, в частности, основанная на собственном поглощении большого числа сред. При этом важно, что вследствие практически локального процесса для случая схемы с продольным теплоотводом визуализация (детектирование) прозрачных структур будет осуществляться в значительной мере без искажений типа усиления краев, имеющих место при поперечном теплоотводе. Из приведенного анализа также следует, что ячейки Цернике с продольным теплоотводом в ряде случаев более предпочтительны, хотя и требуют специального изготовления. Схемы, использующие тонкопленочные твердотельные фототермические фильтры, в частности, изготовленные по технологии, описанной выше, могут отслеживать нежелательные уходы и вибрации [18, 19], что важно для отработки уходов схемы в реальном масштабе времени [2—4], и детектировать фазовые структуры в среде с достаточно высокой чувствительностью, в частности, при плазменных измерениях.

### Литература

1. Борн М., Борн Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973.
2. Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Лекции. Часть 1. — Новосибирск: НГУ, 1999.
3. Lin L., Porkolab M., Edlund E. M. et al. // Physics of plasmas. 2009. V. 16. P. 012502.
4. Sanin A. L., Tanaka K., Vyacheslavov L. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. No. 10. P. 3439.
5. Воронцов М. А., Корябин М. А., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы. — М.: Наука, 1988.
6. Чернега Н. В., Бреховских Г. Л., Кудрявцева А. Д. и др. // Квант. электр. 1989. Т. 16. С. 2530.

7. Trevino-Palacios C. G., Iturbe-Castillo M. D., Sanchez-de-la-Llave et al. // Appl. Opt. 2003. V. 42. P. 5091.
8. Pushpa A. K. et al. // Ibid. 2009. V. 48. P. 5259.
9. Бубис Е. Л. // ПТЭ. 2009. № 1. С. 119.
10. Бубис Е. Л. // Квант. электр. 2011. Т. 41. № 6. С. 568.
11. Bubis E. L., Matveev A. Z. // Proc. SPIE. 2007. V. 6729. P. 82.
12. Stein A. // IEEE J. Quantum Electron. 1974. V. 10. No. 4. P. 427.
13. Hu C., Whinnery J. R. // Appl. Opt. 1973. V. 12. P. 72.
14. Norman P., Barnes and Julie A. Williams-Byrd. // JOSA B. 1995. V. 12. No. 1. P. 124.
15. Буфетова Г. А. и др. // Краткие сообщения по физике. 2008. № 4. С. 28.
16. Кожеватов И. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. С. 638.
17. Голубцов А. А. // Квант. электр. 1981. Т. 8. № 2. С. 370.
18. Lei Gao, Yunfei Yan, Xiaoqiang Sun et al. // Optical Engineering. 2009. V. 48. No. 12. P. 124601.
19. Бабин А. А., Бубис Е. Л., Лошкарев В. В. и др. // Квант. электр. 1998. Т. 28. № 8. С. 738.

## Detecting inhomogeneities of medium by the phase contrast method with Zernicke photothermal cell

*E. L. Bubis, Yu. A. Mamaev, V. O. Martynov, A. S. Sergeev*  
 Institute of Applied Physics  
 46 Ul'yanov str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
 E-mail: bel@appl.sci-nnov.ru

*S. A. Gusev*  
 Institute for Physics of Microstructures  
 GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
 E-mail: gusev@ipm.sci-nnov.ru

*I. E. Kozhevator*  
 Research Radiophysical Institute (NIRFI)  
 25 Bolshaya Pecherskaya str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
 E-mail: kozhevator@nirfi.sci-nnov.ru

*Certain questions of medium inhomogeneities detection by the phase contrast method with Zernicke photothermal cell are considered. Results of numerical simulation are shown.*

PACS: 07.60.-j

*Keywords:* phase contrast method, Zernicke photothermal cell.

Bibliography — 19 references.

*Received March 20, 2012*