

УДК 535.548

## Исследование процессов визуализации и инвертирования объектов фазоконтрастным методом с нелинейными фильтрами

Е. Л. Бубис, В. В. Ложкарев, А. Н. Степанов, А. И. Смирнов, И. В. Кузьмин,  
О. А. Мальшакова, С. А. Гусев, Е. В. Скороходов

*Проведено исследование адаптивного фазоконтрастного метода с нелинейными фильтрами Цернике. Использовались линейные и фототермические фильтры. В качестве фототермических фильтров Цернике использовались частично поглощающие излучение жидкостные и полимерные среды. Экспериментально продемонстрирована эффективная визуализация и инвертирование изображения мелкомасштабных модельных объектов. Визуализирована межсекторальная граница в нелинейном кристалле.*

PACS: 07.60.-j

*Ключевые слова:* нелинейная оптика, обработка изображений, фазовый контраст.

### Введение

Метод фазового контраста широко используется для визуализации мелкомасштабных слабых (фаза  $\varphi < 1$ ) объектов [1—3]. Для преобразования фазовой модуляции, вносимой исследуемым объектом в освещающий пучок, в амплитудную модуляцию в фокальной плоскости объектива (т. н. Фурье-плоскости) устанавливается фазовый экран (фильтр Цернике), вносящий селективный сдвиг  $\theta_z = \pm\pi/2$  (для объектов с фазой  $\varphi \ll 1$ ) между нулевой и высшими пространственными частотами, участвующими в формировании изображения данного объекта. Изначально предложенный Ф. Цернике в 1934 г. метод фазового кон-

траста использовался ранее в основном в микрокопии. Впоследствии метод распространился до использования в физике плазмы (измерение слабых флуктуаций), акустических волн, газовых потоков и т. д.

В данной работе описаны исследования метода фазового контраста с нелинейными фильтрами Цернике [2, 4—25]. В методе нелинейного фазового контраста расфазировка пространственных частот осуществляется в кубично-нелинейной среде (в нелинейном фильтре Цернике), расположенной в той же Фурье-плоскости, где пространственные гармоники разделены.

По сравнению со схемами, использующими линейные ячейки Цернике, это более гибкие адаптивные схемы, а требуемый сдвиг фаз достигается путем выбора соответствующей интенсивности света, поступающей в нелинейную среду.

Процесс визуализации фазовых объектов реализован в фазоконтрастных схемах с фильтрами Цернике, использующие следующие типы нелинейности: керровская [4—7], бактериородопсина [8, 9], фоторефрактивная [10], ориентационной жидких кристаллов [11—16], термокапиллярной [17], нелинейность насыщения [18] и др. (см., например, [19, 20]). В представленной работе в фазоконтрастной схеме использовались фототермические фильтры [9, 21—25] на тепловом механизме нелинейности. Данный механизм является наиболее низкороговым для непрерывного и квазинепрерывного лазерного излучения в простых, доступных средах.

Бубис Евгений Львович, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Ложкарев Владимир Викторович, заведующий отделом<sup>1</sup>.  
Степанов Андрей Николаевич, заведующий лабораторией<sup>1</sup>.  
Смирнов Александр Ильич, ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Кузьмин Игорь Валерьевич, инженер<sup>1</sup>.  
Мальшакова Ольга Анатольевна, ведущий технолог<sup>1</sup>.  
Гусев Сергей Александрович, старший научный сотрудник<sup>2</sup>.  
Скороходов Евгений Владимирович, инженер<sup>2</sup>.  
<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН).  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.  
Тел. 8 (960) 166-82-45. E-mail: bel@appl.sci-ppov.ru  
<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН (ИФМ РАН).  
Россия, 603087, Нижегородская обл., Кстовский район,  
д. Афонино, ул. Академическая, 7.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.

© Бубис Е. Л., Ложкарев В. В., Степанов А. Н., Смирнов А. И.,  
Кузьмин И. В., Мальшакова О. А., Гусев С. А.,  
Скороходов Е. В., 2016

### Экспериментальные исследования

В экспериментах использовалась оптическая схема, изображенная на рис. 1 (сплошная линия — прямой свет, штрихованная линия — дифрагированная волна на объекте). В качестве источника излучения использовался зеленый лазерный модуль KLM с длиной волны  $\lambda = 530$  нм. Мощность источника в данном случае не превышала  $P \leq 10$  мВт. Объект 2 располагался в предметной плоскости ОР. Он просвечивался лазерным излучением, которое фокусировалось объективом 3 в кювету с поглощающей жидкостью (рис. 1, а) или в линейный фильтр с высотой ступеньки 265 нм (рис. 1, б), расположенных в Фурье-плоскости FP. КМОП-камера, расположенная в плоскости изображения IP, регистрировала полученное изображение.

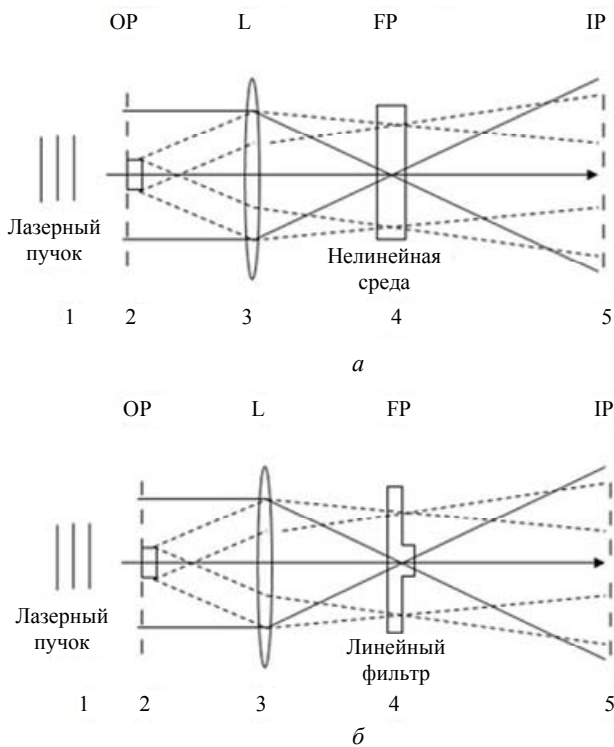


Рис. 1. Оптические схемы, использованные в экспериментах: а — схема с нелинейной средой в виде кюветы с поглощающей жидкостью; б — схема с линейным фильтром.

На рис. 2 представлены результаты визуализации фазового объекта. Из представленного рисунка следует, что визуализация происходит достаточно эффективно. Это важно для построения практических схем измерения слабого поглощения среды [18]. Из данных рисунков видно, что приемлемое качество изображения сохраняется на начальной стадии теплового самовоздействия (рис. 2, б, в, г), далее качество ухудшается из-за наличия сильной тепловой линзы.

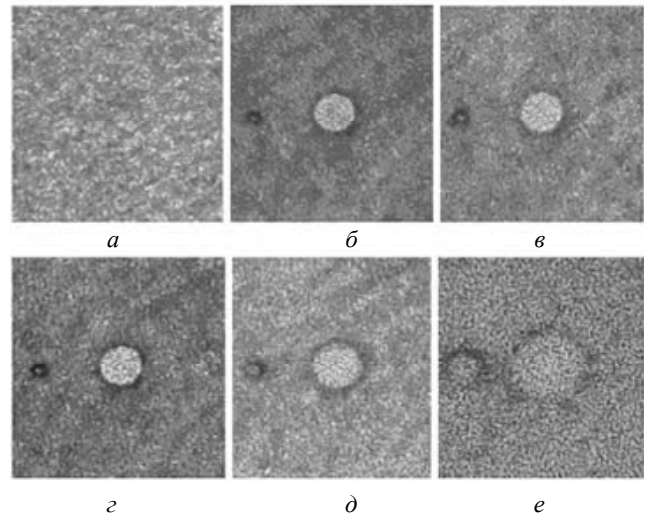


Рис. 2. Визуализация прозрачного объекта со сдвигом фазы  $\lambda/2$  при использовании жидкостной ячейки (спирт с добавлением йода) в зависимости от мощности лазерного излучения: а — фильтр в Фурье-плоскости отсутствует; б — фильтр помещен в Фурье-плоскость, мощность лазерного излучения  $P = 1$  мВт; в —  $P = 2$  мВт; г —  $P = 3$  мВт; д —  $P = 5$  мВт; е —  $P = 9$  мВт. Диаметр кружка  $d = 150$  мкм.

На рис. 3 показана визуализация фазового объекта (решетки) с помощью линейного фильтра со ступенькой высотой 265 нм, расположенной в Фурье-плоскости линзы, а также визуализация этого же образца, полученная с использованием фототермического фильтра (в виде полимерной пластинки).

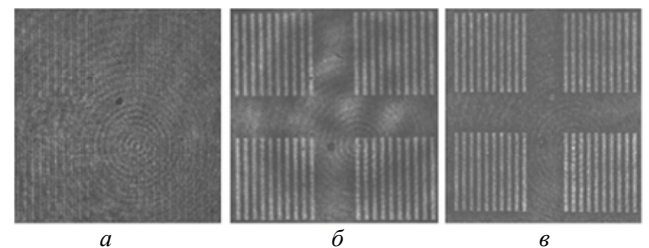


Рис. 3. Визуализация фазового объекта с помощью линейного фильтра и фототермического фильтра: а — фильтры отсутствуют; б — линейный фильтр (диск Цернике) помещен в Фурье-плоскость; в — фототермический фильтр также помещен в Фурье-плоскость.

Структуры для проведения экспериментов формировались методом электронно-лучевой литографии из тонких пленок ПММА 950, нанесенных на кварцевые или стеклянные подложки. Экспонирование структуры проводилось на электронном микроскопе SUPRA 50VP (Carl Zeiss), оборудованном системой электронной литографии ELPHY PLUS. На последнем этапе глубина рельефа (толщина пленки ПММА) доводилась до требуемого значения с помощью сухого травления в кислородной плазме. Глубина рельефа контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа,

либо на оптическом интерференционном микроскопе Talysurf CCI 2000.

Из рис. 3 следует, что изображение, полученное с фототермическим фильтром, свободно от ложных структур, которые связаны, в частности, с краевыми эффектами при настройке положения фазового диска Цернике диаметром 150 мкм.

На рис. 4 представлены прямое и инвертированное микроизображения названий места работы авторов. Буквы представляют собой непрозрачные участки алюминиевой пленки толщиной >500 Å, высотой 30 мкм, которые сформированы методом литографии. В качестве фототермического фильтра использовалась полимерная пластинка толщиной 2 мм. Пропускание данной пластинки на рабочей длине волны (532 нм) составляет ~0,5.



Рис. 4. Прямое и инвертированное микроизображение названия места работы сотрудников. Размер букв 30 мкм.

На рис. 5 представлено визуализированное изображение межсекториальной границы в нелинейном кристалле KDP. Ранее линейным шпирен-методом и методом флуоресценции подобная граница была зарегистрирована в работах [26, 27].

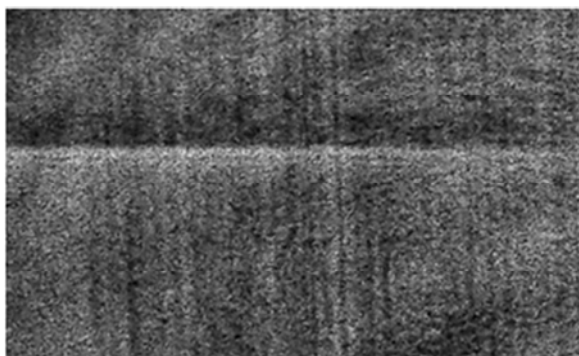


Рис. 5. Визуализированное изображение межсекториальной границы роста в кристалле KDP.

### Заключение

В данной работе проведено исследование адаптивного фазоконтрастного метода с нелинейными фильтрами Цернике. Нами зарегистрировано хорошее качество визуализации прозрачных объектов и структур, а также инвертирование непрозрачных объектов с использованием простой

фазоконтрастной техники. Продемонстрирована визуализация модельных объектов, а также межсекториальная граница в нелинейном кристалле KDP.

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

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы. — М., 1954.
2. Воронцов М. А., Корябин М. А., Шмальгаузен В. И. Управляемые оптические системы. — М.: Наука, 1988.
3. Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Лекции, Часть 1. — Новосибирск, НГУ, 1999.
4. Чернега Н. В., Бреховских Г. Л., Кудрявцева А. Д., Кирсанов Б. П., Соколовская А. И. // Квант. электр. 1989. Т. 16. С. 2530.
5. Goy A., Psaltis D. // Physical Review. Ser. A. 2011. Vol. 83. P. 031802(R).
6. Zhengyan L., Chih-Hao P., Yen-Yu C. // Optics Letters. 2013. Vol. 38. No. 23. P. 5157.
7. Бубис Е. Л., Корытин А. И., Степанов А. Н., Мальков Ю. А., Мурзанов А. А., Яшунин Д. А. / Труды XIII Международной конференции «ОМФИ-2015» (Москва, 2015 г). С. 152.
8. Iturbe Castillo M. D., Sanchez-de-la-Llave D., Ramos Garcia R., Olivos-Pérez L., González L. A., Rodríguez-Ortiz M. // Opt. Eng. 2001. Vol. 40. No. 11. P. 2367.
9. Carlos Gerardo Treviño-Palacios, Marcelo David Iturbe-Castillo, David Sánchez-de-la-Llave, Ruben Ramos-García, Luis Ignacio Olivos-Pérez // Appl. Opt. 2003. Vol. 42. P. 5091.
10. Junmin Liu, Jingjun Xu, Guangyin Zhang, Simin Liu // Applied Optics. 1995. Vol. 34. No. 22. P. 4972.
11. Vorontsov M. A., Justh E. W., Beresnev L. A. // J. Opt. Soc. Am. Ser. A. 2001. Vol. 18. P. 1289.
12. Бубис Е. Л., Будаговский И. А., Золотко А. С. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 4. С. 4.
13. R Porrás-Aguilar, JC Ramírez-San-Juan, O Baldovino-Pantaleon, D May-Arrijoja, ML Arroyo Carrasco, MD Iturbe Castillo, D Sánchez-de-La-Llave, R Ramos-Garcia // Optics Express. 2009. Vol. 17. No. 5. P. 3417.
14. Miao Yu, Vorontsov M. A. // SPIE Proceedings. 2005. Vol. 5998. P. 286.
15. Yelleswarapu C. S., Kothapalli S., Aranda F. J., and Rao D. V. G. L. N. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 2111161.
16. Yelleswarapu C. S., Kothapalli S., Rao D. V. G. L. N. // Optics Communications. 2008. Vol. 281. P. 1876.
17. Бубис Е. Л. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 12. С. 29.
18. Pavlov A, Pavlov A, Golubev M. / 16th Int Symp on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (Lisbon, Portugal, 2012). P. 1.
19. Pushpa Ann Kurian and C. Vijayan // Appl. Opt. 2009. Vol. 48. No. 28. P. 5259.
20. Komorowska K., Miniewicz A., Parka J., Kajzar F. // J. of Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 5635.
21. Бубис Е. Л. // Квант. электр. 2011. Т. 41. № 6. С. 568.

22. Бубис Е. Л., Матвеев А. З. // Квант. электр. 2012. Т. 42. № 4. С. 361.
23. Бубис Е. Л., Гусев С. А., Ложкарев В. В., Кожеватов И. Е., Мартынов В. О., Силин Д. Е., Степанов А. Н. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 113.
24. Бубис Е. Л., Гусев С. А., Кожеватов И. Е., Мартынов В. О., Мамаев Ю. А., Сергеев А. С. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 16.
25. Бубис Е. Л., Гусев С. А., Кожеватов И. Е., Мартынов В. О., Степанов А. Н. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 408.
26. Pomme's M., Damiani D., Borgne X. Le // Optics Communications. 2007. Vol. 275. P. 372.
27. Junxiu Chang, Yuan Zhao, Guohang Hu, Yueliang Wang, et al. // Chinese Optics Letters. 2015. Vol. 13. Issue 8. P. 081601.

## Processes of visualization and image inversion by the phase-contrast method with linear and nonlinear filters

*E. L. Bubis<sup>1</sup>, V. V. Lozhkarev<sup>1</sup>, A. N. Stepanov<sup>1</sup>, A. I. Smirnov<sup>1</sup>, I. V. Kuzmin<sup>1</sup>,  
O. A. Malshakova<sup>1</sup>, S. A. Gusev<sup>2</sup>, and E. V. Skorokhodov<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>Institute of Physics of Microstructures of the RAS  
7 Academicheskaya Str., Afonino, Kstovsky district, Nizhny Novgorod region, 603087, Russia

*Received April 26, 2016*

***Consideration is given to the adaptive phase-contrast method with Zernike filters. We used the linear and photothermal filters. Photothermal Zernike filters partially absorbing the radiation of the liquid and polymer environment were used. Efficient rendering and image inverting the small-scale model objects have been demonstrated experimentally. A growth-sector boundary in a nonlinear crystal has been visualized.***

PACS: 07.60.-j

**Keywords:** nonlinear optics, image processing, phase contrast.

### REFERENCES

1. M. Fransson, Phase-contrast and Interference Microscopes. (Revue d'Optique, Paris, 1952; Moscow, 1954).
2. M. A. Vorontsov, M. A. Koryabin, V. I. Shmalgausen, Controlled Optical Systems (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
3. V. I. Davydenko, A. A. Ivanov, G. Weissen, Experimental Methods of Plasma Diagnostics. The Lecture. Part 1. (Novosibirsk, NSU, 1999) [in Russian].
4. N. In. Chernega, G. L. Brekhovskikh, A. D. Kudryavtseva, B. P. Kirsanov, A. I. Sokolovsky, Quantum. Electr. **16**, 2530 (1989).
5. A. Goy and D. Psaltis, Physical Review, Ser. A **83**, 031802(R) (2011).
6. L. Zhengyan, P. Chih-Hao, C. Yen-Yu, Optics Letters, **38** (23), 5157 (2013).
7. E. L. Bubis, A. I. Korytin, A. N. Stepanov, Y. A. Malkov, A. A. Arsenev, D. A. Yashunin, in *Proceedings of the XIII International conference "OMFI-2015"* (Moscow, 2015), P. 152.
8. M. D. Iturbe Castillo, D. Sanchez-de-la-Llave, R. Ramos Garcia, L. Olivos-Pérez, L. A. González, M. Rodríguez-Ortiz, Opt. Eng. **40** (11), 2367 (2001).
9. Carlos Gerardo Treviño-Palacios, Marcelo David Iturbe-Castillo, David Sánchez-de-la-Llave, Ruben Ramos-García, Luis Ignacio Olivos-Pérez, Appl. Opt. **42**, 5091 (2003).
10. Junmin Liu, Jingjun Xu, Guangyin Zhang, Simin Liu, Applied Optics, **34**, 4972 (1995).
11. M. A. Vorontsov, E. W. Justh, L. A. Beresnev, J. Opt. Soc. Am. Ser. A **18**, 1289 (2001).
12. E. L. Bubis, I. A. Budagovsky, A. S. Zolot'ko, etc., Instrum. Exp. Tech., No. 4, 4 (2016).
13. R. Porras-Aguilar, JC Ramirez-San-Juan, O. Baldovino-Pantaleon, D. May-Arrijoja, ML Arroyo Carrasco, MD Iturbe Castillo, D Sánchez-de-La-Llave, R Ramos-García, Optics Express **17**, 3417 (2009).
14. Yu. Miao, M. A. Vorontsov, SPIE Proceedings **5998**, 286 (2005).
15. C. S. Yelleswarapu, S. Kothapalli, F. J. Aranda, and D. V. G. L. N. Rao, Appl. Phys. Lett. **89**, 2111161 (2006).

16. C. S. Yelleswarapu, S. Kothapalli, and D. V. G. L. N. Rao, *Optics Communications* **281**, 1876 (2008).
17. E. L. Bubis, *Technical Physics Letters* **34** (6), 510 (2008).
18. A. Pavlov, A. Pavlov, and M. Golubev, in *Proc. 16th Int Symp on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, (Lisbon, Portugal, 2012). P. 1.
19. Pushpa Ann Kurian and C. Vijayan, *Appl. Opt.* **48** (28), 5259 (2009).
20. K. Komorowska, A. Miniewicz, J. Parka, and F. Kajzar, *J. of Appl. Phys.* **92**, 5635 (2002).
21. E. L. Bubis, *Quantum Electronics* **41**, 568 (2011).
22. E. L. Bubis, A. Z. Matveev, *Quantum Electronics* **42**, 361 (2012).
23. E. L. Bubis, S. A. Gusev, V. Loshkarev, I. E. Kozhevato, V. O. Martynov, D. E. Silin, A. N. Stepanov, *Instruments and Experimental Techniques*, No. 5, 620 (2014).
24. E. L. Bubis, S. A. Gusev, I. E. Kozhevato, V. O. Martynov, A. Yu. Mamaev, and A. S. Sergeev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 16 (2012).
25. E. L. Bubis, S. A. Gusev, and I. E. Kozhevato, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 408 (2013).
26. M. Pommie's, D. Damiani, and X. Le Borgne, *Optics Communications*, **275**, 372 (2007).
27. Junxiu Chang, Yuan Zhao, Guohang Hu, Yueliang Wang, et al, *Chinese Optics Letters*, **13** (8), 081601 (2015).