

Фазоконтрастный метод построения изображений на основе быстрой керровской оптической нелинейности воздуха

А.А.Мурзанев, **Е.Л.Бубис**, А.И.Корыгин, А.Н.Степанов

Реализованы визуализация прозрачного фазового объекта (газовый поток) и самоинвертирование непрозрачного амплитудного объекта (металлическая проволока) фазоконтрастным методом при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения непосредственно в атмосферном воздухе, основанные на быстром керровском механизме оптической нелинейности.

Ключевые слова: керровская нелинейность, фазовый контраст, визуализация фазовых объектов, нелинейный фазоконтрастный фильтр Цернике.

1. Введение

Классический фазоконтрастный метод построения оптических изображений фазовых объектов [1] основан на создании фазового сдвига между низкочастотной частью пространственного фурье-спектра лазерного пучка и его высокочастотной частью, содержащей информацию об изображении объекта. Для этих целей используют фильтр Цернике – стеклянную пластину в виде диска, диаметр которого равен ширине фурье-спектра невозмущенного лазерного пучка, а толщина обеспечивает фазовый сдвиг, равный $\pm\pi/2$. Недостатки метода связаны со сложной юстировкой схемы и ее чувствительностью к внешним воздействиям, к которым относятся вибрация, температурная деформация, а также турбулентность воздуха. В связи с этим в последние три десятилетия активно исследовались нелинейные фазоконтрастные методы, в качестве фильтра Цернике в которых используется слой нелинейно-оптической среды [2]. Сдвиг фаз в таких схемах достигается за счет фазовой самомодуляции пространственного спектра лазерного излучения вблизи фурье-плоскости оптической системы. Выбор уровня мощности (энергии в импульсе) лазерного излучения, освещающего объект, позволяет управлять контрастом его изображения. Были разработаны эффективные фазоконтрастные схемы с фильтрами Цернике, в которых используются следующие типы нелинейности: керровская [3, 4], фоторефрактивная [5, 6], тепловая [7–9], нелинейность насыщения поглощения [10], а также ориентационная нелинейность бактериородопсина [11] и жидких кристаллов [12–16].

В настоящей работе нелинейный фильтр Цернике был основан на быстрой кубической нелинейности связанных электронов слоя атмосферного воздуха при нормальных условиях. Фазоконтрастный метод построения изображений прозрачных (поток газа) и непрозрачных амплитуд-

ных (металлическая проволока) объектов был реализован при фокусировке мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздух. Данные исследования представляют интерес для диагностики быстропотекающих процессов, а также для приложений дистанционного зондирования атмосферы.

2. Эксперимент

Схема эксперимента представлена на рис.1. Для построения фазоконтрастных изображений использовалось излучение фемтосекундной лазерной системы Tsunami-Spitfire (Spectra-Physics Lasers Inc.). Система генерировала лазерные импульсы на длине волны 800 нм с энергией 1 мДж, длительностью 50 фс и частотой следования 1 кГц. Одномодовый коллимированный лазерный пучок диаметром 8.4 мм по уровню e^{-2} , прошедший через исследуемые объекты, расположенные в предметной плоскости оптической системы, фокусировался с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 см в атмосферный воздух. В плоскости наблюдения находилась КМОП-матрица камеры Motion Pro x3 (Redlake Inc.) с размерами пикселей 12×12 мкм. Расстояния от предметной плоскости до линзы и от линзы до плоскости наблюдения были равны 200 см, что обеспечивало перенос изображения исследуемых объектов без изменения масштаба.

В данной схеме в основе фильтра Цернике лежит оптическая нелинейность атмосферного воздуха: необходимая фазовая модуляция фурье-спектра мощного лазерного пучка получается при его самовоздействии вблизи

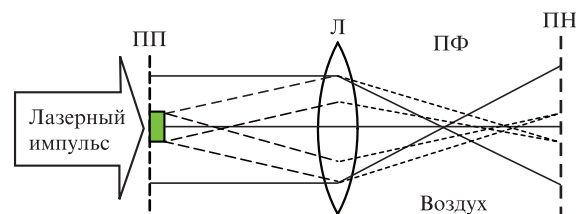


Рис.1. Схема эксперимента: ПП – предметная плоскость; Л – линза; ПФ – плоскость Фурье; ПН – плоскость наблюдения.

А.А.Мурзанев, **Е.Л.Бубис**, А.И.Корыгин, А.Н.Степанов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: murzanev@ufr.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 21 марта 2018 г.

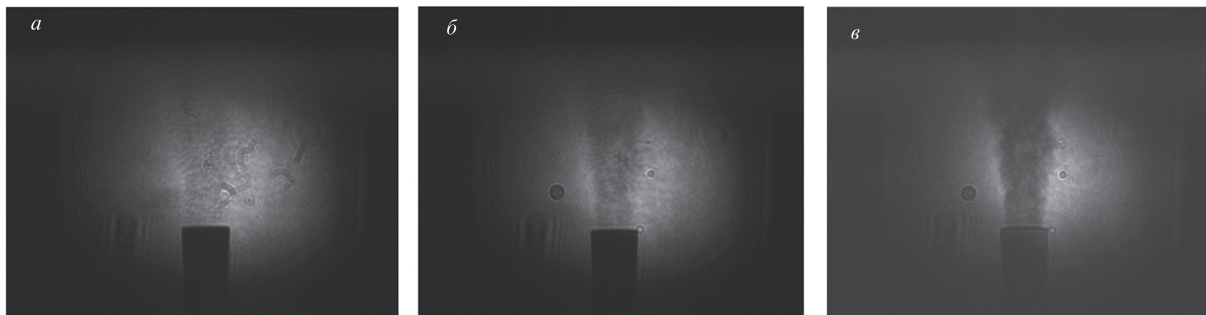


Рис.2. Фазоконтрастные изображения струи неона в воздухе (видимый размер сопла 2.4 мм) при энергии фемтосекундного лазерного импульса 100 (а), 200 (б) и 500 мкДж (в).

плоскости Фурье (ПФ). Вследствие керровской нелинейности, возникающей при прохождении излучения через воздушную среду в области перетяжки (ПФ), лазерный импульс приобретает фазовый набег, что обеспечивает расфазировку пространственных частот и приводит к изменению контраста изображения исследуемых объектов.

Тестовым фазовым объектом служила струя газообразного неона, вытекающего под давлением ~1 атм из щелевого сопла сечением 2.4×0.5 мм в атмосферный воздух. На рис.2 представлены изображения потока неона, полученные фазоконтрастным методом при различных энергиях (100, 200 и 500 мкДж) импульса падающего излучения. Как видно из рис.2, использование в качестве фазоконтрастного фильтра Цернике быстрой керровской нелинейности слоя воздуха действительно позволяет получать изображения фазовых объектов без дополнительной прецизионной юстировки оптической системы. Другой положительной чертой реализованного подхода является оперативность. В отличие от интерферометрического метода, требующего постобработки, визуализация фазового объекта происходит в каждом лазерном импульсе на экране ПЗС-камеры (при достаточной величине фазы, вносимой объектом). Отметим также, что метод обладает фемтосекундным временным разрешением, определяемым длительностью лазерного импульса, т.е. он применим для исследования быстропротекающих процессов. Из рис.2 следует, что контраст полученных изображений газового потока, определяемый соотношением $K = (I_{\text{beam}} - I_{\text{obj}}) / I_{\text{beam}}$, где I_{obj} – яркость изображения в области объекта, а I_{beam} – яркость изображения невозмущенного лазерного пучка, зависит от энергии лазерных импульсов и возрастает с увеличением энергии.

На рис.3 представлена зависимость контраста изображения потока газа от энергии лазерных импульсов.

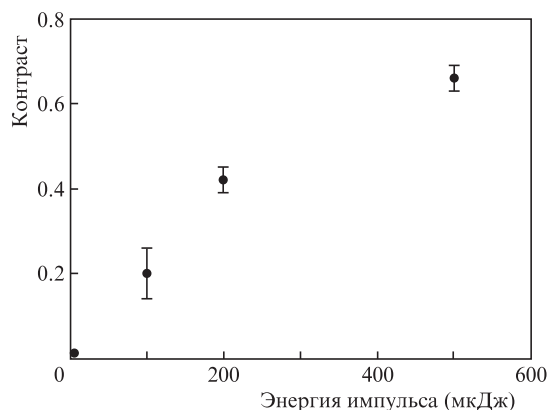


Рис.3. Контраст изображения газовой струи в зависимости от энергии лазерных импульсов

Контраст изображения прозрачного фазового объекта в условиях эксперимента линейно возрастал с ростом энергии вплоть до 200 мкДж. При больших энергиях импульсов зависимость отклонялась от линейной, наибольший контраст ($K \approx 0.65$) достигался при максимальной энергии лазерных импульсов, использованных в эксперименте, 500 мкДж.

На рис.4 представлены изображения непрозрачного (амплитудного) объекта (в наших экспериментах это металлическая проволока диаметром 100 мкм), полученные нелинейным фазоконтрастным методом с помощью фемтосекундных лазерных импульсов с той же энергией, которая использовалась в экспериментах со струей газа.

По сравнению со случаем фазовых объектов зависимость контраста изображения амплитудного объекта от энергии лазерных импульсов является обратной. При малых энергиях контраст изображения высокий – в пучке

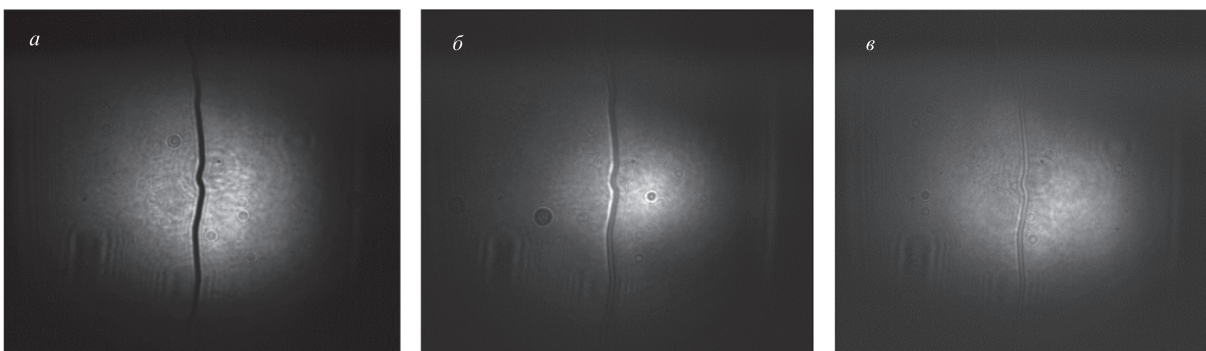


Рис.4. Фазоконтрастные изображения амплитудного объекта (проволока диаметром 100 мкм) при энергии импульса 100 (а) 200 (б) и 500 мкДж (в).

наблюдается тень от объекта (рис.4,*a*). С увеличением энергии лазерных импульсов контраст изображения сначала уменьшается (рис.4,*b*), а затем изображение объекта инвертируется (рис.4,*в*), т.е. яркость изображения объекта становится больше яркости изображения лазерного пучка.

3. Заключение

Предложен и осуществлен экспериментально нелинейный фазоконтрастный метод с использованием быстрой керровской нелинейности при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения в атмосферный воздух при нормальных условиях. Впервые продемонстрирована возможность построения этим методом фазоконтрастных изображений прозрачных фазовых объектов и изображений амплитудных объектов с инвертированной яркостью.

Представленный метод при использовании среды с быстрым откликом в качестве фильтра Цернике на основе быстрой керровской нелинейности может служить для диагностики с высоким пространственным и временным разрешениями быстропротекающих процессов, таких, например, как филаментация фемтосекундного лазерного излучения в атмосфере, сопровождающаяся образованием плазменных каналов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2014-0006) и при поддержке РФФИ (грант № 15-02-08212).

1. Марешаль А., Франсон М. *Структура оптического изображения* (М.: Мир, 1964).
2. Воронцов М.А., Корябин М.А., Шмальгаузен В.И. *Управляемые оптические системы* (М.: Наука 1988).
3. Чернега Н.В., Бреховских Г.Л., Кудрявцева А.Д., Кирсанов Б.П., Соколовская А.И. *Квантовая электроника*, **16** (12), 2530 (1989) [*Quantum Electron.*, **19**, 1626 (1989)].
4. Li Z., Pai C.-H., Chang Y.-Y., Zgadzaj R., Wang X., Downer M.C. *Opt. Lett.*, **38**, 5157 (2013).
5. Liu J., Xu J., Zhang G., Liu S. *Appl. Opt.*, **34**, 4972 (1995).
6. Heebner J.E., Boyd R.W. *Opt. Commun.*, **182**, 243 (2000).
7. Sendhil K., Vijayan C., Kothiyal M.P. *Opt. Las. Eng.*, **44**, 122 (2006).
8. Бубис Е.Л. *Письма в ЖТФ*, **34**, 29 (2008).
9. Бубис Е.Л., Киселев А.М., Кузьмин И.В. *Оптика и спектроскопия*, **121** (5), 822 (2016).
10. Павлов А.А., Павлов Ал.А., Голубев М.П. *Вестник НГУ. Серия: Физика*, **9** (1), 15 (2014).
11. Castillo M.D.I., Sanchez-de-la-Llave D., Ramos-Garcia R., Olivos-Perez L.I., Gonzalez L.A., Rodriguez-Ortiz M. *Opt. Eng.*, **40** (11), 2367 (2001).
12. Vorontsov M.A., Justh E.W., Beresnev L.A. *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (6), 1289 (2001).
13. Komorowska K., Miniewicz A., Parka J., Kajzar F. *J. Appl. Phys.*, **92** (10), 5635 (2002).
14. Yelleswarapu C.S., Kothapalli S.-R., Rao D.V.G.L.N. *Opt. Commun.*, **281** (7), 1876 (2008).
15. Porras-Aguilar R., Ramirez-San-Juan J.C., Baldovino-Pantaleón O., May-Arrijoja D., Arroyo Carrasco M.L., Iturbe Castillo M.D., Sánchez-de-la-Llave D., Ramos-Garcia R. *Opt. Express*, **17** (5), 3417 (2009).
16. Бубис Е.Л., Будаговский И.А., Золотко А.С., Смаев М.П., Швецов С.А., Бобровский А.Ю. *ПТЭ*, **4**, 84 (2016).