

Эффект самовизуализации прозрачных объектов и структур при фокусировке пространственно-фазомодулированного лазерного излучения в слабопоглощающую среду*

Е.Л.Бубис

Описан эффект самовизуализации прозрачных объектов и структур при фокусировке пространственно-фазомодулированного лазерного пучка в протяженную слабопоглощающую среду. Требуемый для эффективной визуализации уровень мощности соответствует мощности освещающего пучка на начальной стадии развития тепловой самодиффузии в среде. В основе эффекта лежит идеология классического метода фазового контраста Цернике. Зарегистрировано усиление четкости границ в визуализированном изображении прозрачных объектов с резкими краями. Продемонстрирована визуализация микрообъекта в виде прозрачных букв и долгоживущих флуктуаций показателя преломления в жидком глицерине. Вследствие адаптивности представленного процесса, в отличие от классического, визуализация будет иметь место и в ситуациях, приводящих к смещению (блужданию) пучка как целого в фурье-плоскости, например в условиях тепловых потоков.

Ключевые слова: метод фазового контраста Цернике, нелинейная оптика, тепловое самовоздействие лазерного пучка.

Классический метод фазового контраста широко используется при наблюдении (визуализации) прозрачных локализованных объектов и структур [1–6]. Для преобразования фазовой модуляции, вносимой исследуемым объектом в освещающий пучок, в амплитудную, в фокальной плоскости объектива (фурье-плоскость) устанавливается фазовый экран (фильтр Цернике), вносящий селективный сдвиг фаз $\theta = \pm\pi/2$ между нулевой и высшими пространственными гармониками, участвующими в формировании изображения данного объекта. В методе нелинейного фазового контраста расфазировка пространственных частот осуществляется в кубически-нелинейной среде (нелинейный фильтр Цернике), также расположенной в фурье-плоскости, где пространственные гармоники разделены [4, 7–16]. По сравнению со схемами, в которых используются линейные ячейки Цернике, это более гибкие адаптивные схемы, а требуемый сдвиг фаз достигается в них путем выбора соответствующей интенсивности света, поступающего в нелинейную среду.

Визуализация фазовых объектов в схемах с тонкими фототермическими фильтрами была реализована в [9–14]. В настоящей работе сообщается о визуализации прозрачных объектов, основанной на тепловом механизме нелинейности, в схеме с протяженной (оптически толстой) слабопоглощающей средой. Использование протяженной среды не только снижает мощность лазерного излучения, необходимую для расфазировки пространственных частот, но и делает процесс полностью адаптивным, т. е. не зависящим ни от угла падения освещающего пучка, ни от положения фокальной области внутри среды. Это особенно важно при визуализации крупных

фазовых объектов, размеры которых сравнимы с диаметром освещающего пучка, и в условиях блуждания пучка в фурье-области. Эффективное преобразование фазовой модуляции в сочетании с хорошим качеством визуализированного изображения прозрачной структуры имеет место в небольшом диапазоне мощностей освещающего лазерного пучка, а сама самовизуализация при распространении световых пучков в слабопоглощающих протяженных средах несомненно является новым эффектом. В области малых тепловых изменений показателя преломления среды величина нелинейного набега фаз недостаточна для требуемого рассогласования фаз ($\theta = \pm\pi/2$) и, следовательно, для эффективной визуализации, а при больших нелинейных набегах фаз качество визуализированного изображения ухудшается из-за сильного теплового самовоздействия лазерного пучка, освещающего прозрачный объект в среде. По аналогии с эффектом самовоздействия данный эффект может называться эффектом самовизуализации. Распространяясь в слабопоглощающей среде, сфокусированный в нее пучок сам меняет фазовые соотношения между пространственными гармониками, участвующими в формировании изображения, в результате чего при определенной мощности (энергии) происходит эффективная визуализация присутствующих в нем фазовых неоднородностей (структур). Время ее установления τ определяется из соотношения $\tau \approx d^2/4\chi$, где d – максимальный диаметр греющего пучка в среде; χ – коэффициент температуропроводности, равный, например, $\sim 1.5 \times 10^{-3}$ см²/с для воды и $\sim 2 \times 10^{-1}$ см²/с для воздуха.

При использовании технологических лазеров переход фазовой модуляции в амплитудную может также быть побочным (сопровождающим возникновение тепловой линзы) отрицательным эффектом, подчеркивающим неоднородности волнового фронта исходного пучка и дополнительно снижающим его качество в плоскости обрабатываемого объекта вследствие нелинейности канала, передающего излучение.

* Доложена на конференции «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2010 г.

Е.Л.Бубис. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: bel@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 25 февраля 2011 г.

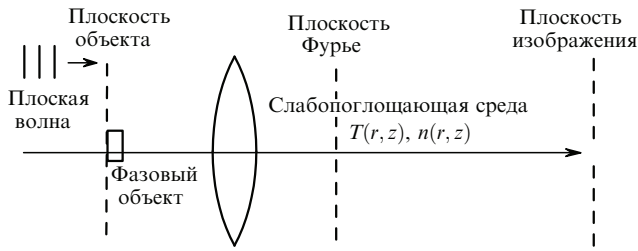


Рис.1. Схема наблюдения эффекта самовизуализации ($T(r, z)$, $n(r, z)$) – распределения температуры и показателя преломления в среде.

Схема наблюдения эффекта представлена на рис.1. Она состоит из простой однолинзовой системы формирования изображения с фототермической ячейкой, расположенной в фурье-плоскости системы. Поглощающая среда может занимать все пространство от объектива до плоскости изображения.

Прозрачные объекты, расположенные в плоскости объекта, освещались гауссовым пучком излучения одномодового линейно поляризованного He–Ne-лазера мощностью $P \leq 6$ мВт на длине волны $\lambda = 0.63$ мкм или пучком излучения зеленой лазерной указки с $\lambda = 0.53$ мкм и $P \leq 30$ мВт. Регулировка мощности излучения осуществлялась поворотом призмы Глана (на рис.1 не показана) вокруг своей оси и измерялась калориметром ИМО-2М. Прошедшее через объект излучение фокусировалось линзой в середину кюветы, заполненной этиловым спиртом или водой с добавлением поглотителя.

Потери на поглощение подбирались такими, чтобы $\alpha l \approx 0.2 - 0.6$ (α – коэффициент поглощения среды, l – ее длина). Использовались кюветы длиной $l = 1 - 300$ мм. На экране, расположенном в плоскости изображения на расстоянии до 10 м от линзы, визуализированные изображения исследуемых прозрачных объектов фотографировались цифровым фотоаппаратом или (в прямом пучке) фотоаппаратом без объектива.

Согласно [2] в фазоконтрастной системе при наличии фазового объекта, вносящего в плоскую волну небольшой локальный фазовый сдвиг $\varphi(x, y) < 1$, распределение интенсивности света в плоскости изображения при сдвиге фаз θ между нулевой и высшими пространственными гармониками имеет вид

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

Из (1) следует, что малые фазовые набег в предметной плоскости линейно трансформируются в изменения интенсивности в плоскости изображения. В зависимости от знака фазы имеет место положительный (светлый) или отрицательный (темный) контраст. При больших фазовых сдвигах линейность нарушается, но визуализация прозрачных объектов все равно имеет место.

Проведем простые оценки энергии (в случае нестационарного освещения объекта) и мощности (в случае непрерывного освещения), требуемых для наблюдения эффекта.

Сфокусированный в оптически толстую (бесконечную) слабопоглощающую среду одномодовый световой пучок с энергией E вследствие ее нагрева в нестационарном случае приобретает дополнительный фазовый сдвиг

$$\theta = 2\pi \frac{E}{E_{\text{cr}}},$$

где

$$E_{\text{cr}} = \frac{2\pi\rho c_p}{\alpha k^2 (\partial n / \partial T)_p}$$

– критическая энергия теплового самовоздействия (см., напр., [17]); ρ – плотность среды; c_p – ее теплоемкость при постоянном давлении; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $(\partial n / \partial T)_p$ – температурная производная показателя преломления (при постоянном давлении). Для воды в видимом диапазоне спектра при $\alpha \approx 10^{-3} - 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ требуемая энергия составляет десятки миллиджоулей. В нестационарном случае фазовый сдвиг для прямоугольного импульса есть линейная функция времени, и нужная величина $\theta = \pi/2$ достигается лишь к его концу.

При непрерывном освещении требуемая мощность P оценивается из соотношения [18, 19]

$$\theta = \frac{\pi}{2} = \frac{\alpha l P}{\kappa \lambda (\partial n / \partial T)},$$

где κ – коэффициент теплопроводности среды. Используя табличные данные и принимая $\alpha l \approx 0.3$, получаем $P \approx 1$ мВт для спирта, $P \approx 15$ мВт для воды и $P \approx 150$ мВт для воздуха. Распределение температуры в стационарном случае не совпадает с распределением теплового источника. Однако, как показано в расчетах [13], по крайней мере для тонкой среды нелокальность процесса не сильно сказывается на качестве визуализированного изображения в подобных схемах, за исключением некоторого усиления четкости границ, имеющего место в первую очередь для объектов с резкими краями, размеры которых сравнимы с диаметром освещающего пучка. Экспериментальное подтверждение этого факта представлено на рис.4.

На рис.2,а и б представлены визуализированные изображения флуктуаций показателя преломления в глицерине, возникшие в результате механических возмущений [20]. Изображение на рис.2,б получено при полностью выдвинутой из фурье-плоскости кювете с поглощающей средой и, следовательно, при отсутствии эффекта самовизуализации.

На рис.2,в показана фотография визуализированного изображения фазового микрообъекта, изготовленного в виде букв, толщина линий которых равна 10 мкм. В данных случаях использовалась слабопоглощающая ($\alpha \approx 2 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$) оптически толстая ($l \geq 100l_d$) среда. Здесь l_d – дифракционная длина освещающего пучка в среде.

На рис.3 показана эволюция эффекта самовизуализации двух пересекающихся световодов, находящихся в кю-

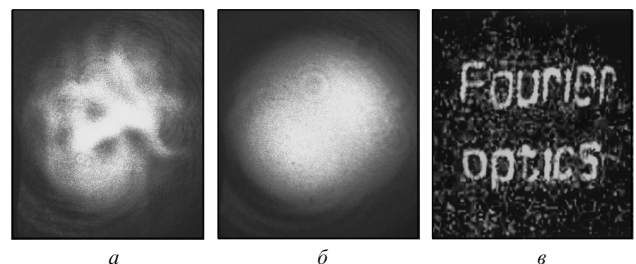


Рис.2. Визуализированные изображения флуктуаций показателя преломления в глицерине, возникших в результате его механических возмущений, при наличии эффекта самовизуализации (а) и в его отсутствие (б); в – визуализированное изображение микрообъекта.

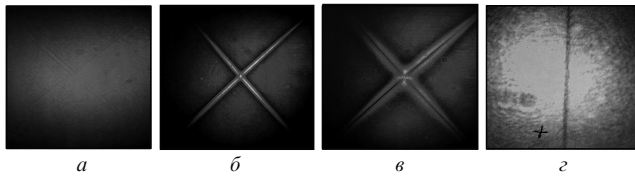


Рис.3. Изображения двух пересекающихся световодов, находящихся в кювете с иммерсионным маслом, в отсутствие эффекта самовизуализации (а) и при его наличии и мощностях лазерного излучения 1.2 (б) и 3 мВт (в), а также визуализированное изображение ребра бипризмы Френеля (з).

вете с иммерсионным маслом. Изображение на рис.3,а получено при выдвинутой из фурье-плоскости кювете. Рисунки 3,б и в демонстрируют эффект самовизуализации при мощностях излучения лазера 1.2 и 3 мВт соответственно. На рис.3,в ясно наблюдается инверсия изображения с искажениями из-за теплового самовоздействия пучка в среде. При мощности излучения $P \geq 5$ мВт уширение пучка в отсутствие объекта хорошо видно в дальней зоне. Таким образом, основным конкурирующим эффектом, препятствующим эффективной самовизуализации, является тепловое самовоздействие освещающего пучка в поглощающей среде.

На рис.3,з представлено визуализированное изображение фазового объекта – ребра бипризмы Френеля. В этом эксперименте самовизуализация происходила в свете зеленой лазерной указки мощностью 25 мВт в кювете длиной 37 см с неочищенной сырой водой. Время «проявления» изображения составляло единицы секунд.

Было исследовано также качество визуализированного изображения прозрачной полоски шириной 120 мкм. Его фотография и распределение яркости в нем показаны на рис.4. Видно, что в процессе самовизуализации имеет место усиление четкости границ объекта, предсказанное теоретически [13]. На визуализированных изображениях рис.3,б и в этот эффект также отчетливо виден.

Таким образом, в работе представлены основные характеристики эффекта самовизуализации прозрачных объектов и структур при фокусировке пространственно-фазомодулированного лазерного излучения в слабопоглощающую среду. Требуемый уровень мощности для эффективной визуализации соответствует мощности начальной стадии развития теплового самовоздействия освещающего лазерного пучка – важного и наиболее низкочастотного нелинейно-оптического явления, возникающего при распространении непрерывного и квазинепрерывного лазерного излучения в естественных средах. Вследствие того, что самовизуализация не зависит от угла падения освещающего пучка и от положения фокальной области внутри среды, она может быть осуществлена в условиях реальной атмосферы даже при наличии

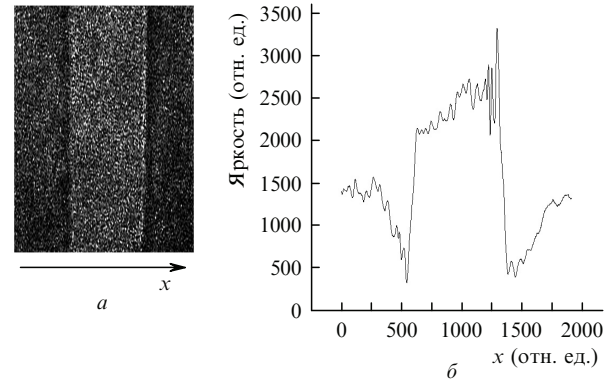


Рис.4. Визуализированное изображение прозрачной полоски (а) и распределение яркости в нем (б).

в ней тепловых потоков, приводящих к смещению перетяжки пучка в фурье-плоскости как целого. С учетом линейности преобразования, в частности при фототермических процессах [5], схемы, построенные на основе эффекта самовизуализации, могут использоваться также для прецизионной диагностики и измерений слабых флуктуаций плотности газовых, в том числе и плазменных, сред.

Работа поддержана грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ № НШ 4690.2006.2.

1. Борн М., Борн Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973).
2. Франсон М. *Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы* (М.: Физматлит, 1960).
3. Рытов С.М. *УФН*, **41** (4), 425 (1950).
4. Воронцов М.А., Корябин М.А., Шмальгаузен В.И. *Управляемые оптические системы* (М.: Наука, 1988).
5. Бабин А.А., Бубис Е.Л., Лошкарёв В.В. и др. *Квантовая электроника*, **28** (8), 738 (1998); Альтшуллер В.М., Бубис Е.Л., Шубин С.В. *Препринт ИПФ РАН № 241* (Н.Новгород, 1989).
6. Zharov V.P., Galitovsky V., Viegas M. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (24), 4897 (2003).
7. Чернега Н.В., Бреховских Г.Л., Кудрявцева А.Д. и др. *Квантовая электроника*, **16**, 2530 (1989).
8. Vorontsov M.A., Justh E.W., Beresnev L.A. *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**, 1289 (2001).
9. Komarowska K. et al. *J. Appl. Phys.*, **92**, 5635 (2002).
10. Trevino-Palacios C.G. et al. *Appl. Opt.*, **42**, 5091 (2003).
11. Бубис Е.Л. *Препринт ИПФ РАН № 698* (Н.Новгород, 2006).
12. Бубис Е.Л., Матвеев А.З. *Письма в ЖТФ*, **33** (11), 8 (2007).
13. Bubis E.L., Matveev F.Z. *Preprint IAP RAS № 737* (N.Novgorod, 2007).
14. Бубис Е.Л. *Письма в ЖТФ*, **34** (12), 29 (2008).
15. Бубис Е.Л. *ПТЭ*, № 1, 119 (2009).
16. Pushra A.K. et al. *Appl. Opt.*, **48** (28) 5259 (2009).
17. Бубис Е.Л., Дроботенко В.Б., Кулагин О.В. и др. *Квантовая электроника*, **15** (1), 147 (1988).
18. Сухоруков А.П. *УФН*, **101** (1), 81 (1971).
19. Смит Д.К. *Труды ИИЭР*, **65** (12), 59(1977).
20. Стебновский С.В. *ЖТФ*, **72** (11), 24 (2002).