

07

Визуализация прозрачных объектов фазоконтрастным методом с фототермической ячейкой Цернике

© Е.Л. Бубис, А.З. Матвеев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: amatveev@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 7 ноября 2006 г.

Получена визуализация фазовых объектов в фазоконтрастном методе с фототермической ячейкой Цернике. Требуемые для работы ячейки плотности мощности излучения составляли менее 1 mW/cm^2 .

PACS: 42.30.-d, 42.65.-k.

Метод фазового контраста, предложенный Ф. Цернике в 1934 г., широко используется для визуализации и исследования прозрачных (фазовых) объектов. Для преобразования фазовой модуляции, вносимой различными элементами объекта в амплитудную, в спектральной плоскости объектива (фурье-плоскости) устанавливается фазовая пластинка Цернике, создающая селективный сдвиг фаз между нулевой и высшими пространственными частотами $\Theta = \pm\pi/2$. В зависимости от знака фазы имеет место положительный (светлый) или отрицательный (темный) фазовый контраст [1–3]. Возможность использования нелинейно-оптических процессов для создания необходимого сдвига фаз в фазоконтрастных системах продемонстрирована в [4,5]. В этом случае юстировка схемы выполняется автоматически, а необходимый сдвиг фаз достигается путем выбора соответствующей интенсивности света, поступающей в нелинейную среду.

В данной работе фазовое рассогласование осуществлено в поглощающей среде на тепловой нелинейности вследствие неоднородного прогрева среды ячейки и, следовательно, формирования соответствующего профиля показателя преломления в фурье-плоскости объектива, где пространственные гармоники разделены.

В фазоконтрастном методе распределение интенсивности света в плоскости изображения $I(x', y')$ для малых величин набега фазы имеет вид [1]

$$I(x', y') \propto I_0 [a^2 + 2a\varphi(x, y) \sin \Theta], \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность падающего на объект света, a — амплитудный коэффициент пропускания ячейки Цернике, $\varphi(x, y)$ — распределение сдвига фаз сразу после фазового объекта, Θ — сдвиг фаз между нулевой и высшими пространственными частотами, вносимый ячейкой Цернике.

При тепловом механизме нелинейности, обусловленном стационарным нагревом среды непрерывным лазерным излучением в условиях, соответствующих данному эксперименту, величину сдвига фаз Θ можно оценить из следующего выражения [6–8]:

$$\Theta \propto \frac{\alpha l P}{\kappa \lambda} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_p, \quad (2)$$

где λ — длина волны падающего света; α, κ — коэффициенты поглощения и теплопроводности среды; l — длина ячейки; P — мощность сильной спектральной компоненты, поступающей в ячейку; n — показатель преломления среды. Время установления стационарного распределения температуры в среде будет определяться временем диффузии тепла поперек пучка $t_d \sim d^2/\chi$, где d — максимальный размер, в общем случае, сложной световой структуры в кювете, χ — коэффициент температуропроводности. Это распределение является нелокальной функцией поля. Иными словами, распределение температуры в пространстве не совпадает с распределением источника тепла, что является в данном случае причиной, приводящей к уменьшению контрастности визуализированного изображения. В большинстве жидкостей $(\partial n/\partial T)_p < 0$ и, следовательно, имеет место отрицательный, или темный, фазовый контраст, в то время как для оптических стекол, как правило, $(\partial n/\partial T)_p > 0$ (см., например, [9]), и в данном случае контраст будет светлым.

В работе в качестве нелинейной ячейки Цернике использовались жидкостные кварцевые кюветы, заполненные этиловым спиртом, водой, уксусом или тетрахлорметаном с добавлением небольшого количества поглотителя. Используя необходимые данные, например, для спирта $((\partial n/\partial T)_p = 4 \cdot 10^{-4} \text{ grad}^{-1}, \kappa = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{grad}), \lambda = 0.63 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, \alpha = 0.3 \text{ cm}^{-1}, l = 1 \text{ cm})$, получаем, что для сдвига

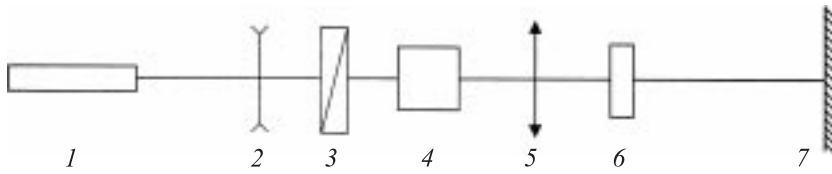


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — He–Ne-лазер ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $P = 6 \text{ mW}$); 2 — отрицательная линза, $F = -75 \text{ cm}$; 3 — поляризационный аттенюатор (призма Глана); 4 — фазовый объект; 5 — положительная линза, $F = 15 \text{ cm}$; 6 — фототермическая ячейка; 7 — экран.

фаз $\Theta \sim 1 \text{ rad}$ требуется мощность сильной спектральной компоненты в кювете $P \sim 10^{-3} \text{ W}$, что и выполнялось в эксперименте. Нагрев среды в условиях эксперимента не превышал долей градуса. Уровень мощности в 10^{-3} W соответствует начальной стадии развития тепловой самодефокусировки лазерных пучков, которая в данном случае является конкурирующим процессом.

Схема установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался одномодовый He–Ne-лазер 1 (мощность $P_0 \leq 6 \text{ mW}$, поляризация — линейная). Пучок расширялся отрицательной линзой 2 и поступал на фазовый объект 4. Регулировка мощности излучения осуществлялась за счет поворота призмы Глана 3 вокруг своей оси. Мощность света измерялась калориметром ИМО-2М. Прошедшее через объект излучение фокусировалось объективом в середину кюветы 6 с нелинейной средой. Величина $\alpha l = 0.3$. В качестве объектива 5 использовалась линза с фокусным расстоянием $F = 15 \text{ cm}$, переносящая изображение объекта 4 с большим увеличением в плоскость экрана 7, на котором визуализированное изображение фазового объекта фотографировалось цифровым фотоаппаратом. В работе использовались фазовые объекты, как помещенные в иммерсионную жидкость, так и без нее.

На рис. 2, а представлена фотография визуализированного изображения ребра бипризмы Френеля — по-видимому, наиболее простого одномерного фазового объекта. Плотность мощности падающего на объект света составляла $I \approx 500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Для проверки нелинейного характера взаимодействия выполнялись часто используемые в нелинейной оптике контрольные эксперименты.

1. Нейтральные оптические светофильтры (на рис. 1 не указаны) устанавливались перед кюветой, а затем после нее.

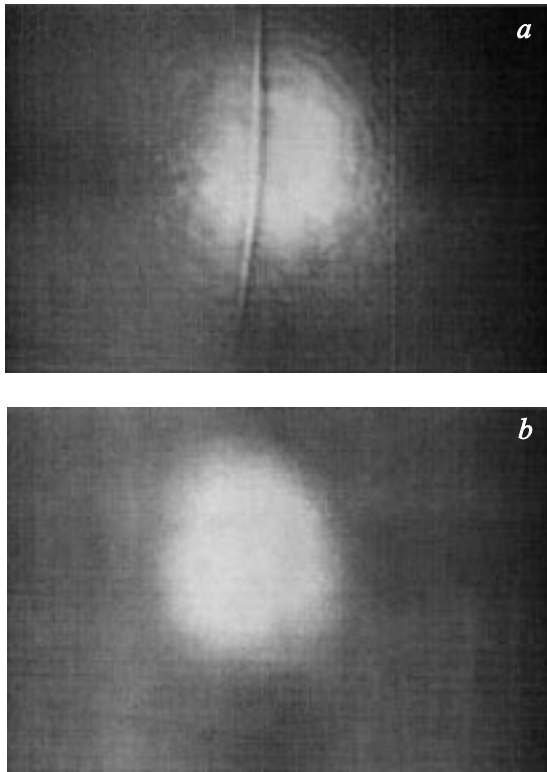


Рис. 2. Визуализированное изображение бипризмы Френеля, увеличение 100: *a* — нелинейная среда находится в фокусе объектива; *b* — нелинейная среда находится вне фокуса.

2. Фотографировалось изображение объекта в случаях помещения ячейки в фокусе линзы и при выдвигании ее из области фокусировки.

Рис. 2, *b* соответствует случаю нахождения фототермической ячейки вне области фокусировки. В данном случае визуализации объекта не происходит.

Таким образом, в простой схеме экспериментально продемонстрировано хорошее качество визуализации фазового объекта в фазоконтрастной схеме с использованием фототермической ячейки Цернике.

В заключение отметим, что визуализация фазовых объектов в аналогичных схемах может быть получена в фототермических ячейках не только за счет линейного, но и за счет довольно сильного собственного фундаментального двухфотонного поглощения, имеющего место в тех же, теперь уже чистых, простых средах, в первую очередь в коротковолновом диапазоне спектра в поле излучения импульсных УФ-лазеров [10].

Список литературы

- [1] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. С. 856.
- [2] Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы. М.: Физматлит. 1960. С. 180.
- [3] Zernike F. // Science. 1955. V. 121. N 11. P. 345–349.
- [4] Liu J., Xu J., Zhang G., Liu S. // Appl. Opt. 1995. V. 34. N 22. P. 4972–4975.
- [5] Iturbe Castillo M.D., Sanches-de-la-Liave D., Ramos Garcia R. et al. // Opt. Eng. 2001. V. 40. N 11. P. 2367–2368.
- [6] Сухоруков А.П. // УФН. 1970. Т. 101. В. 1. С. 81–83.
- [7] Смит Д.К. // ТИИЭР. 1977. Т. 65. № 12. С. 59–103.
- [8] *Сверхчувствительная лазерная спектроскопия* / Под ред. Д. Клайджера. М.: Мир, 1986. С. 520.
- [9] Бубис Е.Л., Потемкин А.К., Шубин С.В. // Опт. и спектр. 2001. Т. 90. В. 2. С. 336–340.
- [10] Бубис Е.Л., Соустов Л.В. // ЖПС. 1993. Т. 58. № 3–4. С. 347–350.