

Метод измерения нелинейного показателя преломления по контрасту изображения амплитудного объекта в оптической схеме с фазовыми фильтрами Цернике на основе электронной керровской нелинейности

А.А.Мурзанев, А.И.Корытин, Д.И.Кулагин, А.В.Ромашкин, А.Н.Степанов

Предложен метод определения нелинейного показателя преломления по контрасту изображения амплитудных объектов в фазоконтрастной схеме с исследуемым образцом в качестве фазового фильтра Цернике на основе электронной керровской нелинейности. Метод подразумевает измерение калибровочной зависимости контраста изображения амплитудного объекта от энергии лазерных импульсов для контрольного образца с известной нелинейностью и позволяет определять нелинейный показатель преломления исследуемых образцов за один лазерный импульс.

Ключевые слова: керровская нелинейность, нелинейный показатель преломления, фазовый контраст, нелинейный фильтр Цернике.

1. Введение

Изменение показателя преломления оптических материалов под действием мощного лазерного излучения – один из наиболее изучаемых нелинейно-оптических эффектов, имеющий фундаментальное значение для лазерной и волоконной оптики [1]. Современные методы измерения нелинейно-оптических коэффициентов лазерных материалов используют изменения энергии [2, 3], состояния поляризации [4], спектра [5] или волнового фронта [6] пробного лазерного излучения, обусловленные нелинейным откликом среды. Методы четырехволнового взаимодействия [2, 3] используют брэгговское рассеяние пробного лазерного пучка на решетке нелинейного показателя преломления, сформированной двумя лазерными пучками накачки. В поляризационных методах нелинейность показателя преломления среды вызывает самовращение эллипса поляризации [4] либо, при наличии второго лазерного пучка, эффект оптического стробирования [7]. Спектральные методы основаны на измерении уширения спектра [8], смещения центральной частоты [5] и спектральной фазы [9–11] лазерного излучения. Методы, основанные на измерении нелинейного набега фазы и искажения волнового фронта, включают в себя измерение волнового фронта датчиком Хартмана–Шака [12], порога самофокусировки [13] и распределения интенсивности лазерного пучка в дальней зоне [6]. Широкое распространение получили также методы пространственной интер-

ферометрии [14–16], разнообразной техники z-сканирования [17–24] и нелинейного имиджинга [25–27].

В настоящей работе нами развит метод измерения нелинейного показателя преломления оптических материалов по схеме пространственной нелинейной фильтрации Цернике [25]. В отличие от ранее выполненных работ [24–26], в качестве объекта, используемого для визуализации, был выбран амплитудный объект.

2. Эксперимент

Источником излучения служил лазерный комплекс на кристаллах сапфира с титаном, генерирующий импульсы излучения длительностью $\tau \approx 70$ фс с центральной длиной волны $\lambda_0 \approx 800$ нм. Энергия лазерных импульсов W , падающих на образец, в проведенных экспериментах не превышала 100 мкДж. Она регулировалась с помощью поляризационного аттенюатора. Часть лазерного излучения (рис. 1) направлялась на калиброванный фотодиод для контроля энергии импульсов. Остальная часть излучения попадала в двухлинзовую конфокальную систему переноса изображения, в объектной плоскости которой располагался амплитудный объект (длинная, проходящая через все поперечное сечение пучка, металлическая проволока диаметром 140 мкм). Профиль интенсивности лазерного пучка близок к гауссову, диаметр пучка составлял 13 мм (по уровню e^{-2}). Система переноса изображения состояла из двух ахроматических линз, Л1 и Л2, диаметром 50 мм с фокусными расстояниями 15 и 25 см соответственно, расположенных на расстоянии 40 см друг от друга. Изображение проволоки регистрировалось с помощью ПЗС-камеры (Pixelfly, PCO). Регистрация проводилась в двух режимах: линейном (при низкой мощности лазерного излучения) и нелинейном (рис. 1, б).

Для реализации метода адаптивного фазового контраста в качестве нелинейного фильтра Цернике в фокальной плоскости первой линзы системы переноса изображения устанавливалась или тонкая, толщиной 1 мм, пластина диаметром 50 мм из плавленого кварца, слу-

А.А.Мурзанев, А.И.Корытин, Д.И.Кулагин, А.В.Ромашкин. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: murzanev@ufr.appl.sci-nnov.ru

А.Н.Степанов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Россия, 603951 Н.Новгород, ул. Минина, 24; e-mail: step@ufr.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 6 февраля 2017 г.

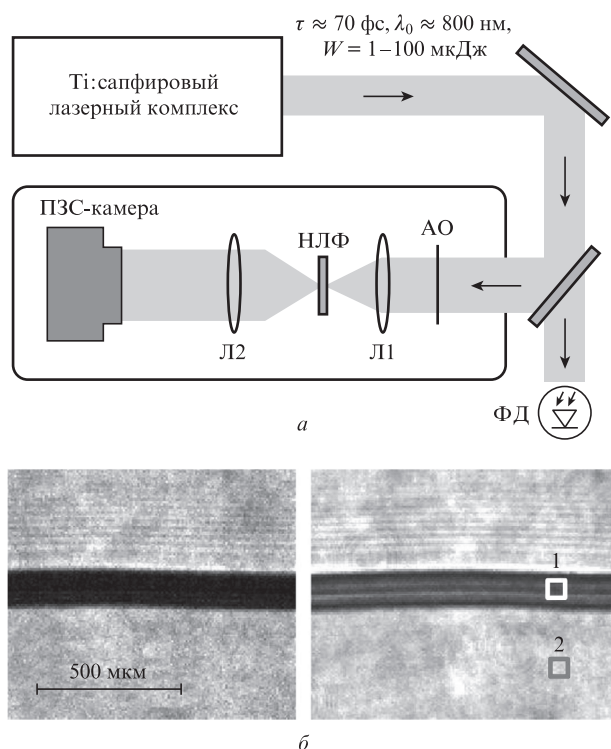


Рис.1. Схема эксперимента (а) и изображение проволоки в линейном (низкая мощность лазерного излучения, слева) и нелинейном (справа) режимах (б):

Л1 и Л2 – ахроматические линзы с фокусными расстояниями 15 и 25 см соответственно; АО – амплитудный объект (проволока диаметром 140 мкм); НЛФ – нелинейный фазовый фильтр; ФД – калиброванный фотодиод; 1 и 2 – области, по отношению сигналов в которых определялся контраст изображения.

жившая контрольным образцом, или пластина толщиной 2 мм из халькогенидного стекла (состав $\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}\text{I}_{10}$, показатель преломления $n = 2.1$ [28]), нелинейный показатель преломления которой мы хотели измерить. Радиус лазерного пучка в месте расположения образцов, выполнявших роль нелинейного фильтра, измерялся с помощью вспомогательной ПЗС-камеры и составил 11 мкм (по уровню e^{-2}), что в 1.8 раза превышало размер дифракционного пятна в фокусе линзы.

3. Обсуждение и анализ результатов

В обычном фазоконтрастном методе для визуализации фазовых объектов в фокусе первой линзы системы переноса изображения устанавливается фазовая пластина с размерами, примерно соответствующими размеру пучка в фокусе, вносящая дополнительный набег фаз световых волн $\sim \pi/2$. В «инвертированной» фазоконтрастной схеме, реализованной в [27], используется объект с известной фазой, и по его изображению делаются выводы о нелинейной фазе, приобретаемой в образце, помещенном в фокусе первой линзы системы переноса изображения. В настоящей работе мы развили инвертированный фазоконтрастный метод с нелинейным фазовым фильтром Цернике, используя амплитудный объект вместо фазового для измерения неизвестного нелинейного показателя преломления исследуемого образца халькогенидного стекла. Основная идея данного метода заключается в том, что мы измеряем зависимость контраста изображения амплитудного объекта от интенсивности лазерного излу-

чения для двух образцов, помещаемых по очереди в фокус системы переноса изображения амплитудного объекта: одного с известным нелинейным показателем преломления (контрольный образец – кварцевая пластинка) и другого, нелинейный показатель преломления которого мы хотим определить (халькогенидное стекло). Контрастом изображения объекта мы называем отношение яркостей изображения в области объекта (область 1 на рис.1,б) и вне ее (область 2). Контраст изображения определяется величиной нелинейной фазы, приобретаемой в образцах [25]. Поэтому одинаковый контраст изображения объекта для двух образцов достигается при одинаковой нелинейной фазе. Приравняв нелинейные фазовые сдвиги, соответствующие одинаковому контрасту изображения в зависимостях контраста изображения объекта от интенсивности лазерного излучения для двух образцов, получим для неизвестного нелинейного показателя преломления халькогенидного образца n_2^{chg} следующее выражение:

$$n_2^{\text{chg}} = n_2^{\text{q}} \frac{I_{\text{q}} I_{\text{q}}}{I_{\text{chg}} I_{\text{chg}}},$$

где I_{q} и I_{chg} – интенсивности лазерного излучения для случаев кварцевой пластинки и тестируемого образца (халькогенидное стекло), при которых достигается одинаковый контраст изображения; n_2^{q} – нелинейный показатель преломления контрольного образца из плавленного кварца; l_{q} и l_{chg} – соответствующие толщины двух образцов.

Экспериментально измеренные зависимости контраста изображения амплитудного непрозрачного объекта (проволоки) от интенсивности лазерного излучения для двух образцов, кварцевой пластины и халькогенидного стекла, приведены на рис.2. Зависимость контраста изображения для халькогенидного стекла с высокой точностью совпадает с аналогичной зависимостью для образца из плавленного кварца при ее сдвиге по оси интенсивности в соответствии с коэффициентом масштабирования $I_{\text{q}}/I_{\text{chg}} \approx 68$.

Единый для всего исследованного диапазона изменений контраста изображения коэффициент масштабирования по интенсивности можно использовать в приведенной выше формуле для любого значения контраста изображения на рис.2. Более того, этот факт позволяет утверждать, что нелинейный показатель преломления исследуе-

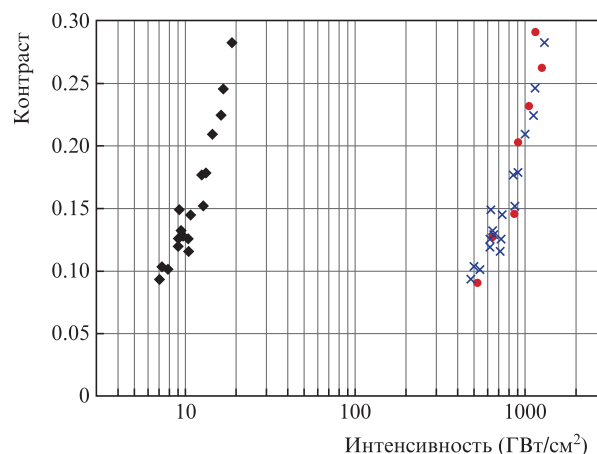


Рис.2. Зависимости контраста изображения амплитудного объекта от интенсивности лазерного излучения для халькогенидного стекла (♦), плавленного кварца (●) и халькогенидного стекла с учетом коэффициента масштабирования $I_{\text{q}}/I_{\text{chg}} = 68$ (×).

мого образца может быть вычислен по указанной формуле с использованием одного изображения, полученного за один лазерный импульс, при наличии калибровочной зависимости контраста изображения амплитудного объекта для контрольного образца (темные кружки на рис.2). Таким образом, при предварительной калибровке предлагаемый метод является одноимпульсным и дает возможность оперативно проводить измерение нелинейного показателя преломления. Используя для нелинейного показателя преломления кварца значение 3.2×10^{-16} см²/Вт [1], с учетом толщин образцов получаем для нелинейного показателя преломления халькогенидного стекла Ge₂₅S₆₅I₁₀ значение $\sim 1.1 \times 10^{-14}$ см²/Вт. Эта величина согласуется с результатами работы [28], в которой измерения проводились с учетом изменения распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне за счет нелинейного набега фазы в образце [6]. Отметим, что максимальный набег нелинейной фазы в образцах в исследованном диапазоне значений контраста изображения не превышает 2.5 рад и не должен приводить к заметному искажению пучка в образцах за счет самофокусировки.

Таким образом, нами предложен и реализован метод измерения нелинейного показателя преломления оптических образцов, основанный на нелинейной модификации фазоконтрастного метода Цернике с использованием фемтосекундных лазерных импульсов и электронной керровской нелинейности. Путем сравнения контрастов изображений амплитудного объекта, полученных с использованием контрольного и исследуемого образцов, нами был измерен нелинейный показатель преломления в образце халькогенидного стекла Ge₂₅S₆₅I₁₀. Данный метод позволяет получать количественную информацию о нелинейном показателе преломления за один лазерный импульс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-00147) в части разработки метода измерений нелинейных свойств халькогенидных образцов и РФФИ (грант №15-02-08212). Работа получила также поддержку в рамках Программы Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения».

1. Boyd R. *Nonlinear Optics* (New York: Academic Press, 2008).
2. Adair R., Chase L.L., Payne S.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **4**, 875 (1987).
3. Friberg S., Smith P. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 2089 (1987).
4. Maker P.D., Terhune R.W., Savage C.M. *Phys. Rev. Lett.*, **12**, 507 (1964).
5. Kang I., Krauss T., Wise F. *Opt. Lett.*, **22**, 1077 (1997).
6. Williams W.E., Soileau M.J., van Stryland E.W. *Opt. Commun.*, **50**, 256 (1984).
7. Duguay M.A., Hansen J.W. *Appl. Phys. Lett.*, **15**, 192 (1969).
8. Wang D., Leng Y., Xu Z. *Appl. Phys. B*, **111**, 447 (2013).
9. Chen Y.H., Varma S., York A., Milchberg H.M. *Opt. Express*, **15**, 11341 (2007).
10. Wahlstrand J.K., Cheng Y.H., Milchberg H.M. *Phys. Rev. A*, **85**, 043820 (2012).
11. Wahlstrand J.K., Zahedpour S., Cheng Y.H., Palastro J.P., Milchberg H.M. *Phys. Rev. A*, **92**, 063828 (2015).
12. Rativa D., De Araujo R.E., Gomes A.S.L., Vohnsen B. *Opt. Express*, **17**, 22047 (2009).
13. Бондаренко Н.Г., Еремина И.В., Макаров А.И. *Квантовая электроника*, **5**, 841 (1978).
14. Moran M., Chiao-Yao S., Carman R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **11**, 259 (1975).
15. Boudebs G., Chis M., Phu X.N. *J. Opt. Soc. Am. B*, **18**, 623 (2001).
16. Dancus I., Popescu S.T., Petris A. *Opt. Express*, **21**, 31303 (2013).
17. Sheik-Bahae M., Said A.A., van Stryland E.W. *Opt. Lett.*, **14**, 955 (1989).
18. Sheik-Bahae M., Said A.A., Wei T.H., Hagan D.J., van Stryland E.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 760 (1990).
19. Wang J., Sheik-Bahae M., Said A.A., Hagan D.J., van Stryland E.W. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 1009 (1994).
20. Hughes S., Burzler J.M., Spruce G., Wherrett B.S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 1888 (1995).
21. Mian S.M., Taheri B., Wicksted J.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, 856 (1996).
22. Petrov D.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, 1491 (1996).
23. Bridges R.E., Fischer G.L., Boyd R.W. *Opt. Lett.*, **20**, 1821 (1995).
24. Fischer M.C., Liu H.C., Piletic I.R., Warren W.S. *Opt. Express*, **16**, 4192 (2008).
25. Xuan N.P., Ferrier J.L., Gazengel J., Rivoire G., Brekhovskikh G.L., Kudriavtseva A.D., Sokolovskaia A.I., Tcherniega N.V. *Opt. Commun.*, **68**, 244 (1988).
26. Boudebs G., Chis M., Bourdin J.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, 1450 (1996).
27. Boudebs G., Cherukulappurath S. *Phys. Rev. A*, **69**, 053813 (2004).
28. Yashunin D.A., Velmuzhov A.P., et al. *J. Non-Cryst. Solids*, **453**, 84 (2016).