

УДК [535:530.182]:532.783

## АБЕРРАЦИОННАЯ КАРТИНА ПРИ САМОВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМ<sub>01</sub> МОДЫ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

И. А. Будаговский<sup>1</sup>, А. С. Золотько<sup>1</sup>, А. А. Кузнецов<sup>1</sup>, М. П. Смаев<sup>1,2</sup>,  
С. А. Швецов<sup>1,3</sup>, А. Ю. Бобровский<sup>3</sup>, Н. И. Бойко<sup>3</sup>, В. П. Шibaев<sup>3</sup>

*Исследованы свойства абберрационной картины, возникающей при самовоздействии моды светового излучения ТЕМ<sub>01</sub> в жидкокристаллических системах. Установлено, что интерференция световых лучей, соответствующих двум пикам интенсивности и нелинейного набегу фазы, приводит к формированию в зоне Фраунгофера системы полос с угловым периодом, определяемым расстоянием между пиками. Эти полосы заполняют всю абберрационную картину (систему концентрических колец) или только ее часть, в зависимости от вида профиля светоиндуцированного набегу фазы. Показаны возможности использования свойств абберрационной картины в ТЕМ<sub>01</sub> моде для исследования светоиндуцированной переориентации директора нематических жидких кристаллов.*

**Ключевые слова:** абберрационная картина, нематические жидкие кристаллы, жидкокристаллические полимеры, самофокусировка, самодефокусировка, самовоздействие света, оптическая нелинейность.

*Введение.* При прохождении гауссова светового пучка через среды с кубичной нелинейностью наблюдается формирование абберрационной картины в виде системы концентрических колец. Такая картина возникает при самофокусировке [1] и самодефокусировке [2] света в случае достаточно большого нелинейного фазового набегу в средах с

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: budagovskyia@mail.ru.

<sup>2</sup> РХТУ им. Д. И. Менделеева, 125047 Россия, Москва, Миусская пл., 9.

<sup>3</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, 1.

тепловой нелинейностью. Ярко выраженные эффекты абберационной самофокусировки и самодефокусировки наблюдаются в низкомолекулярных нематических жидких кристаллах (НЖК) [3–7] и нематических жидкокристаллических полимерах (НЖКП) [8, 9] благодаря их большой оптической анизотропии  $\Delta n \sim 0.2$ . Поскольку число абберационных колец простым образом связано с нелинейным набегом фазы, то эффект абберационного самовоздействия может быть использован для измерения ориентационных нелинейностей. Например, в [7] было показано, что с его помощью можно измерять ориентационную нелинейность даже в присутствии сильных тепловых эффектов. В [10] обсуждалось применение абберационного самовоздействия для измерения скоростей потоков. Наблюдение динамики развития абберационной картины позволяет определять материальные параметры НЖК [11] и регистрировать малые изменения частоты световой волны [12]. В [13] при двукратном (прямом и обратном) прохождении гауссова пучка через НЖК наблюдалась генерация в абберационной картине катастрофы гиперболическая омбилика. Аналогичный оптический эффект возникал и при однократном прохождении гауссова пучка через НЖК с фоторефрактивной нелинейностью [14].

К настоящему времени исследования абберационного самовоздействия ограничивались аксиально симметричной модой  $TEM_{00}$ . В [15] при исследовании взаимодействия света с НЖКП в абберационной картине, наряду с системой концентрических колец, была зарегистрирована система интерференционных полос. Однако этот эффект не был подробно изучен. В настоящей работе экспериментально исследовано взаимодействие моды светового излучения  $TEM_{01}$  с низкомолекулярными и полимерными нематическими жидкокристаллическими системами.

### *Эксперимент.*

Образцы. В качестве экспериментальных образцов использовали несколько типов легированных красителем НЖК и НЖКП: (1) НЖК ЖКМ-1277 с добавкой азокрасителя КД-1 (0.05% по весу), толщиной 100 мкм, гомеотропной ориентации; (2) НЖК ЖКМ-1277 с полимерной добавкой РСАВО-3А (0.2% по весу), толщиной 100 мкм, планарной ориентации и (3) фракционированный полиакрилатный полимер РАА (степень полимеризации 22) с боковыми фрагментами, с добавкой 0.05% КД-1, толщиной 50 мкм, планарной ориентации.

В зависимости от угла падения света на образец с КД-1, в нем проявляются и положительная, и отрицательная нелинейности [16], что позволяет в рамках одного образца рассмотреть оба типа нелинейности. Для образца с добавкой полимера РСАВО

характерна только отрицательная нелинейность, но величина возможного нелинейного набега фазы значительно выше, чем для образца с КД-1. Наконец, последний образец уникален тем, что он обладает нематической фазой при температуре ниже 123 °С, а при комнатной температуре переходит в стеклообразное состояние. Это позволяет записывать индуцированные в нематической фазе деформации директора посредством простого охлаждения, и далее изучать их методами микроскопии.

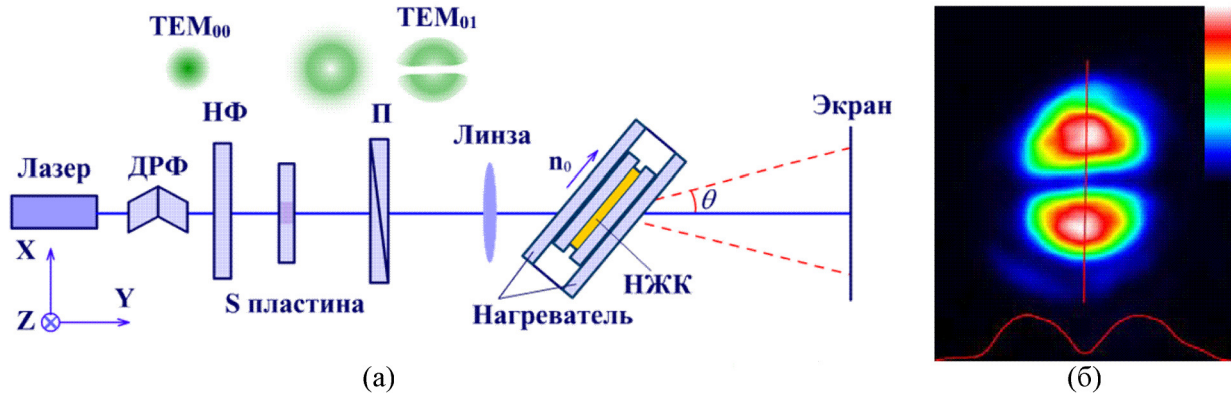


Рис. 1: (а) Схема экспериментальной установки (вид сверху): ДРФ – двойной ромб Френеля, НФ – нейтральный фильтр, П – поляризатор. (б) Распределение интенсивности и нормализованный профиль в вертикальном сечении для пучка  $TEM_{01}$ , полученные с помощью CMOS-камеры.

Экспериментальная установка. Излучение (532 нм) твердотельного лазера проходило через двойной ромб Френеля и фокусировалось на ячейке с НЖК (или НЖКП) посредством линзы с фокусным расстоянием 38 мм (рис. 1(а)). Аберрационная картина наблюдалась на экране в дальней зоне. Ячейка могла вращаться вокруг вертикальной оси. Поляризация излучения, падающего на ячейку, и директор НЖК были ориентированы в горизонтальной плоскости.

Для формирования пучка, аналогичного моде  $TEM_{01}$ , после двойного ромба дополнительно устанавливали S-пластину, которая трансформировала линейно-поляризованный гауссов пучок в тангенциально-поляризованный. После горизонтально ориентированного поляризатора распределение интенсивности пучка соответствовало моде  $TEM_{01}$  (рис. 1(б)).

Нагрев ячейки с жидкокристаллическим полимером (образец 3) осуществляли посредством прозрачного ИТО-нагревателя.

*Результаты и обсуждение.*

Образец 1 (ЖКМ-1277+КД-1). В гомеотропно ориентированном образце с приме­сью КД-1 проявляется знакопеременная нелинейность.

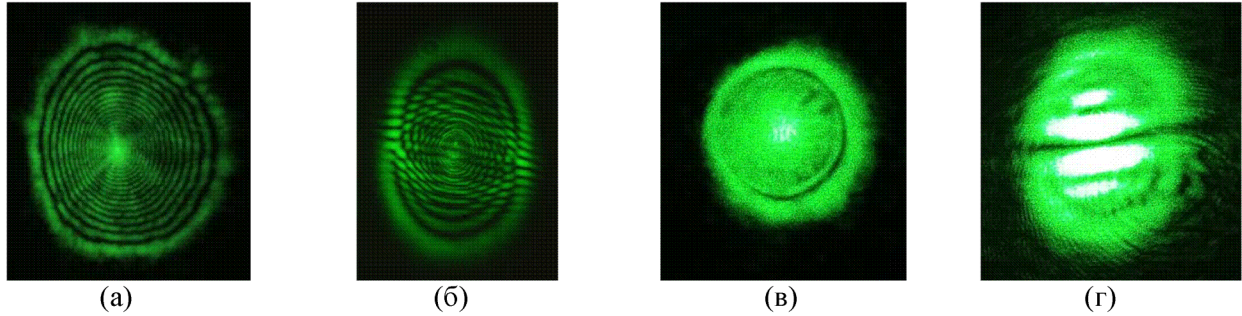


Рис. 2: Абберрационные картины в дальней зоне, наблюдаемые при освещении (а, в) гауссовым световым пучком и (б, г) пучком  $TEM_{01}$  в случае (а, б) положительной ( $\alpha = 35^\circ$ ) и (в, г) отрицательной нелинейности в образце 1 (1277+КД1). Мощность пучка  $P =$  (а) 0.5; (б) 1; (в) 7.5; (г) 13 мВт. Вертикальный угловой размер картин  $\theta_v =$  (а) 0.5; (б) 0.74; (в) 0.18; (г) 0.25 рад.

При угле падения света  $\alpha = 35^\circ$ , превышающем критический (угол  $\alpha_{crit} \approx 32^\circ$ ), т.е. угол, при котором изменяется знак нелинейности, проявляется значительная положительная ориентационная нелинейность при мощностях света в доли мВт. Самовоздействие гауссова пучка мощностью  $P = 0.5$  мВт приводит к развитой системе концентрических колец (рис. 2(а)). Изменение показателя преломления  $\delta n$ , оцененное по числу абберрационных колец  $N = 8$  с помощью соотношения  $\delta n = \lambda N / L$  [9] ( $\lambda$  – длина световой волны,  $L$  – толщина образца), составляет  $\delta n \approx 0.04$ . Абберрационная картина при освещении пучком  $TEM_{01}$  значительно сложнее (рис. 2(б)). Она представляет собой наложение картин, формируемых при светоиндуцированной деформации директора под действием верхней и нижней частей светового пучка. В центре картины наблюдается дополнительная модуляция интенсивности в виде горизонтальных полос. Шаг полос составил 0.034 рад.

При угле падения  $\alpha = 30^\circ$  (меньше критического) наблюдается отрицательная нелинейность. Расходимость абберрационной картины в этом случае меньше из-за малого резерва угла поворота директора. Абберрационная картина при освещении гауссовым пучком (рис. 2(в)) проявляется при мощностях света порядка нескольких мВт, при этом значительный вклад вносит тепловая нелинейность. Освещение пучком  $TEM_{01}$  приводит, как и в случае положительной нелинейности, к абберрационной картине, центр

которой промодулирован горизонтальными полосами (рис. 2(г)). Расстояние между горизонтальными полосами совпадает с шагом полос для случая положительной нелинейности (0.034 рад).

Отметим, что в случае отрицательной ориентационной нелинейности в гомеотропном НЖК возможный угол поворота директора и соответствующий набег фазы малы, а при используемых мощностях света проявляется значительный вклад тепловой положительной нелинейности, нивелирующий ориентационный. Поэтому формирование картины при отрицательной нелинейности НЖК (самодефокусировка) удобнее исследовать в планарном образце с полимерной добавкой РСАВО.

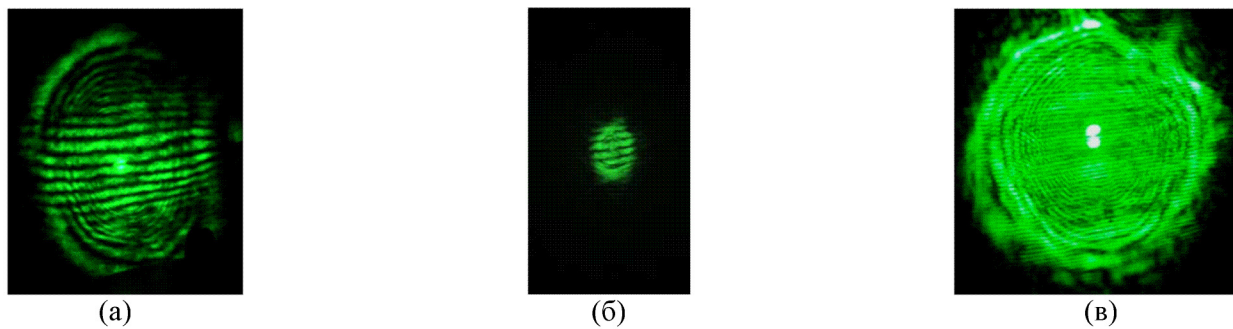


Рис. 3: Аберрационные картины в дальней зоне, наблюдаемые при освещении пучком  $TEM_{01}$  в образце 2 (1277+РСАВО) при разных положениях ячейки относительно фокуса линзы: (а, б) в фокусе, (в) на расстоянии 2 мм от фокуса. Мощность пучка  $P =$  (а) 10; (б) 2.5; (в) 13 мВт. Вертикальный угловой размер картин  $\theta_v =$  (а) 1.4; (б) 0.25; (в) 0.63 рад.

Образец 2 (ЖКМ-1277+РСАВО). В данном образце проявляется только отрицательная нелинейность. Воздействие наклонно ( $\alpha = 30^\circ$ ) падающего пучка  $TEM_{01}$  мощностью  $P = 10$  мВт также формирует характерную картину с горизонтальными полосами в центральной части (рис. 3(а)), расстояние между которыми  $\sim 0.07$  рад. При уменьшении мощности шаг полос несколько уменьшается, и составляет 0.06 рад для  $P = 5$  мВт и 0.05 рад для  $P = 2.5$  мВт (рис. 3(б)). Схожее поведение наблюдается и при развитии картины во времени после включения излучения: шаг полос увеличивался по мере развития картины.

При увеличении размера пучка, что достигалось смещением ячейки из фокуса линзы на 2 мм, шаг полос уменьшался до 0.01 рад (рис. 3(в)).

Как видно из свойств аберрационной картины, воздействие пучка  $TEM_{01}$  приводит к формированию достаточно сложной интерференционной картины, обусловленной

наложением двух компонент пучка, формирующих две близкорасположенные области деформации директора.

Образец 3 (РАА + 0.05%КД-1). Как и для предыдущего образца, для нематического жидкокристаллического полимера с примесью КД-1 наблюдается только отрицательная нелинейность. При самовоздействии пучка  $TEM_{01}$  формируется аналогичная абберационная картина, промодулированная горизонтальными полосами с шагом 3 мм (при расстоянии до экрана  $R = 40$  см). После охлаждения образца до комнатной температуры картина несколько увеличивается, что обусловлено ростом  $\delta n$  всей полимерной матрицы (рис. 4(а)). Микрофотография записанной фазовой структуры в скрещенных поляризаторах (рис. 4(б)) позволяет восстановить профиль набега фазы (рис. 4(в)) и на его основе (рис. 4(г)) провести численное моделирование абберационной картины (рис. 4(д)). Расчет интеграла Кирхгофа дает расстояние между полосами равное 2.9 мм.

Рассмотрим формирование абберационной картины при освещении нелинейной среды модой  $TEM_{01}$ . Два пика интенсивности  $I(z)$  в световом пучке (рис. 5(а)) приводят к переориентации директора и возникновению нелинейного набега фазы  $S(z)$ . В результате происходит деформация волнового фронта. На рис. 5 показан профиль волнового фронта, соответствующий случаю самодефокусировки.

Проанализируем картину, образуемую правым пиком волнового фронта. Луч 1 (рис. 5) с максимальным отклонением  $\theta_m = (2\pi/\lambda)(\partial|S|/\partial z)_{\max}$  соответствует внешнему кольцу абберационной картины. Для любого значения отклонения  $\theta < \theta_m$  существуют два луча 2 и 3, интерференция которых, обусловленная разностью хода, и приводит к кольцевой структуре [1]. Абберационная картина, связанная с одним пиком волнового фронта, образуется в случае гауссова пучка (моды  $TEM_{00}$ ) (см. рис. 2(а)). Для моды  $TEM_{01}$  дополнительно возникает интерференция с отклоненными лучами, обусловленными вторым пиком (рис. 5(б), лучи 1', 2', 3'). Разность фаз между лучами, отклоненными на одинаковый угол (например, 1 и 1' на рис. 5(б), пропорциональная длине отрезка А'Е), связана с расстоянием между пиками  $d$  и углом отклонения луча  $\theta$

$$S_1 = (2\pi/\lambda)d \sin \theta. \quad (1)$$

Интерференция лучей от разных пиков приводит к системе полос, наблюдаемых со всеми исследованными образцами. Угловое расстояние  $\delta\theta$  между полосами, как следует из (1)

$$\delta\theta = \lambda/d. \quad (2)$$

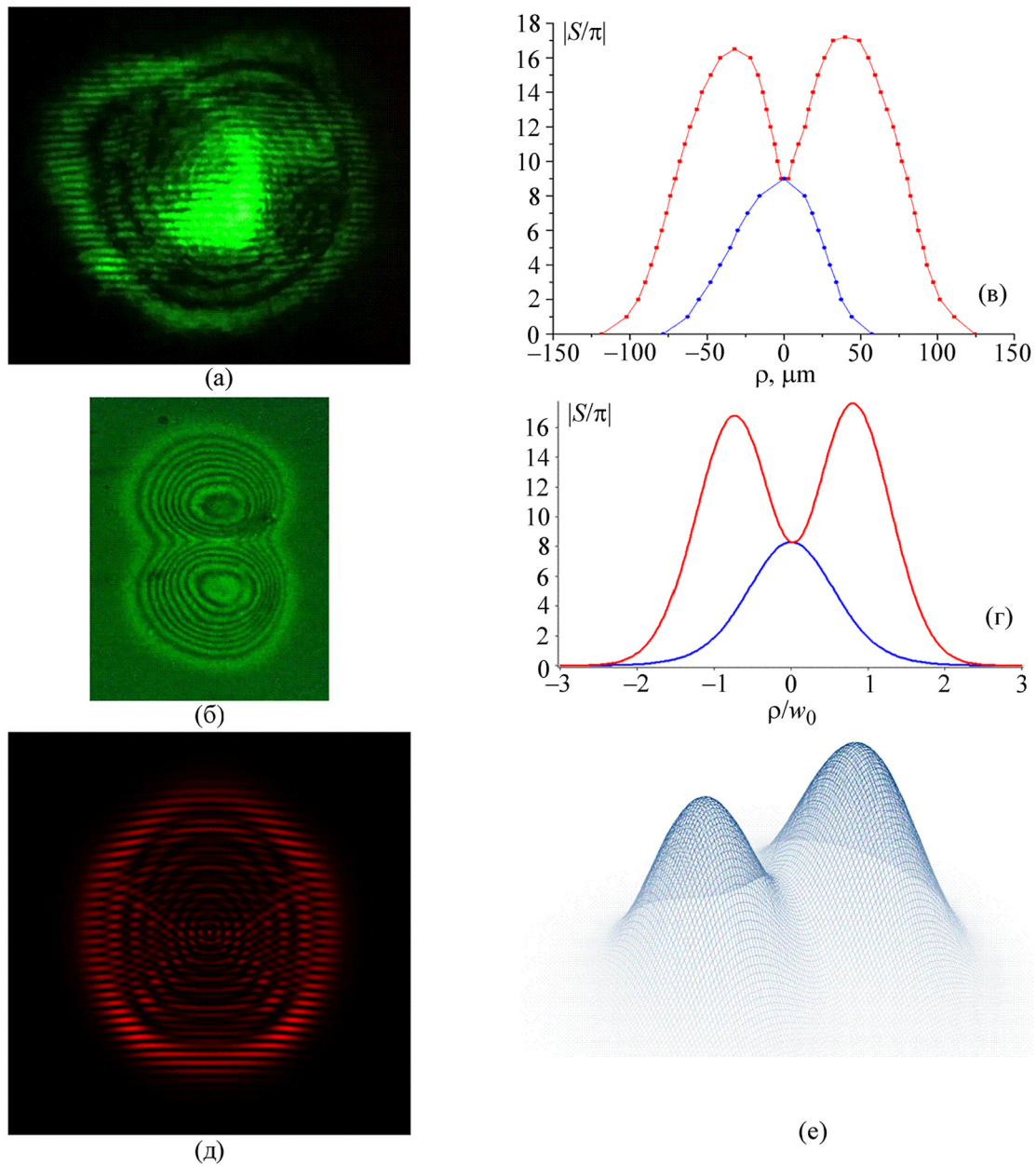


Рис. 4: (а) Аберрационная картина в дальней зоне после охлаждения образца 3 (РАА+КД-1); (б) микрофотография записанной фазовой структуры; (в) профили фазы, восстановленные по горизонтальному (синяя кривая) и вертикальному (красная кривая) сечениям записанной фазовой структуры; (г, е) смоделированные профили фазы, используемые для расчета интеграла Кирхгофа; (д) рассчитанная аберрационная картина.

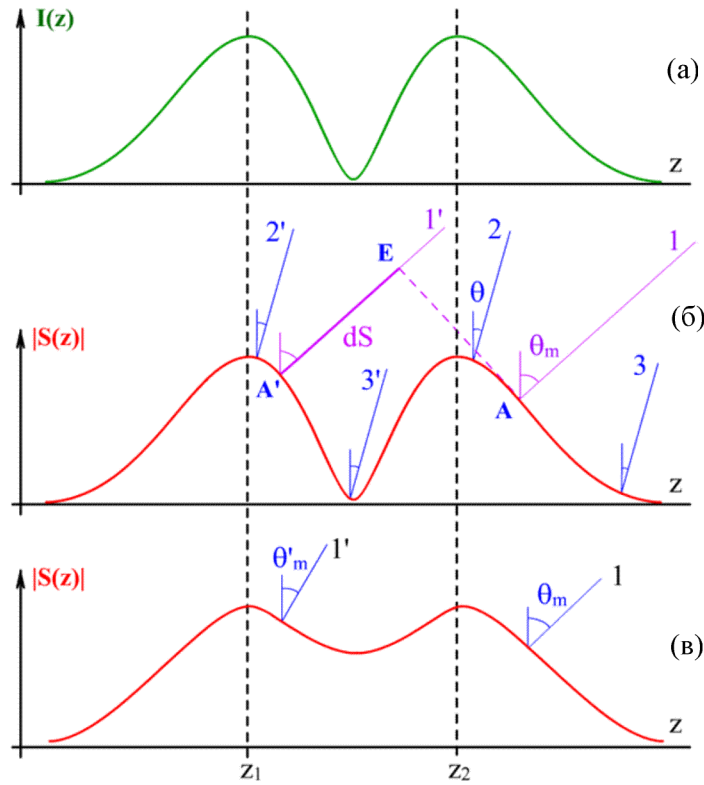


Рис. 5: (а) Профиль интенсивности пучка в вертикальном сечении; (б) профиль фазового набега в случае локального приближения повторяет профиль интенсивности; (в) профиль фазового набега при заметном влиянии поперечных упругих сил.

Для картины на рис. 4(б) расстояние между пиками  $d = 72$  мкм, откуда получаем  $\delta\theta = 7.4 \cdot 10^{-3}$  или шаг полос  $D = \delta\theta \cdot R = 3$  мм при расстоянии до экрана  $R = 40$  см. Как видно, расстояние между пиками достаточно точно определяет шаг полос, что позволяет по расстоянию между полосами оценивать масштаб индуцируемой на кристалл картины.

Формула (1) справедлива для двух симметричных пиков. В рассматриваемом случае моды  $TEM_{01}$  это, строго говоря, не имеет места по двум причинам. Во-первых, для этой моды профили пиков интенсивности не являются симметричными. Во вторых, к искажению пиков приводит нелокальность нелинейнооптического отклика, характерная для жидких кристаллов (рис. 5(в)). Асимметрия пиков может приводить к тому, что интерференционные полосы заполняют только часть абберационной картины, а также к тому, что величина, определенная из эксперимента по формуле (2), будет иметь значение, несколько отличное от расстояния между максимума интенсивности пучка.





Рис. 6: (а) Микрофотография фазовой структуры, сформированной узким ( $w = 7$  мкм) пучком  $TEM_{01}$ . (б) Аберрационная картина в дальней зоне после охлаждения НЖКП; угловое расстояние между полосами  $\delta\theta = 0.05$ .

Асимметрия пиков в распределении фазы особенно заметна для узких пучков, значительно меньших толщины кристалла. В этом случае поперечные упругие силы сглаживают профиль деформации директора, и провал интенсивности в центре пучка почти не разрешается в профиле фазы (рис. 6(а)). Лучи, проходящие через “долину” в центре деформированного участка НЖКП, имеют малый наклон, поэтому полосы проявляются только в центральной части аберрационной картины (рис. 6(б)).

*Заключение.* Аберрационное самовоздействие пучка  $TEM_{01}$  в НЖК с различными типами нелинейности приводит к формированию специфической интерференционной картины, промодулированной горизонтальными полосами. Шаг и расположение полос на картине позволяют установить особенности деформации поля директора, контролировать размер облучаемой области и оценить степень нелокальности нелинейного отклика.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проекты № 18-02-00986-а и № 19-03-00337-а), а также Российским Научным Фондом (проект № 19-13-00029; синтез и характеристика полимеров; А.Б.; Н.Б.; В.Ш.)

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] F. W. Dabby, T. K. Gustafson, J. R. Whinnery, Y. Kohanzadeh, and P.L. Kelley, *Appl. Phys. Lett.* **16**, 362 (1970).
- [2] S. A. Akhmanov, D. P. Krindach, A. V. Migulin, A. P. Sukhorukov, and R. V. Khokhlov, *IEEE J. Quant Electronics* **QE-4**, 568 (1968).

- [3] А. С. Золотько, В. Ф. Китаева, Н. Кроо, Н. Н. Соколов, Л. Чиллаг, Письма в ЖЭТФ **32**, 170 (1980).
- [4] S. D. Durbin, S. M. Arakelian, Y. R. Shen, Opt. Lett. **6**, 411 (1981).
- [5] E. Santamato and Y. R. Shen, Opt. Lett. **9**, 564 (1984).
- [6] A. S. Zolot'ko, I. A. Budagovsky, V. N. Ochkin, et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst. **488**, 265 (2008).
- [7] I. A. Budagovsky, A. S. Zolot'ko, V. F. Kitaeva, M. P. Smayev, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **453**, 71 (2006).
- [8] I. A. Budagovsky, V. N. Ochkin, S. A. Shvetsov, et al., Phys. Rev. E **95**, 052705 (2017).
- [9] I. Budagovsky, A. Kuznetsov, S. Shvetsov, et al., J. Mol. Liq. **276**, 275 (2019).
- [10] N. V. Tabiryan, S. R. Nersisyan, M. Warengem, Phys. Rev. Lett. **77**, 3355 (1996); J. Appl. Phys. **83**, 1 (1998).
- [11] А. С. Золотько, В. Ф. Китаева, В. А. Куюмчян и др., Письма в ЖЭТФ **36**, 66 (1982).
- [12] G. Cipparrone, D. Duca, C. Umeton, and N. V. Tabiryan, Phys. Rev. Lett. **71**, 3955 (1993).
- [13] N. V. Tabiryan, B. Ya. Zel'dovich, M. Kreuzer, T. Vogeler, and T. Tschudi, J. Opt. Soc. Am. B **13**, 1426 (1996).
- [14] И. А. Будаговский, А. С. Золотько, М. П. Смаев, М. И. Барник, ЖЭТФ **138**, 150 (2010).
- [15] I. Budagovsky, A. Kuznetsov, S. Shvetsov, et al., Polymers **12**, 356 (2020).
- [16] М. И. Барник, А. С. Золотько, В. Г. Румянцев, Д. Б. Терсков, Кристаллография **40**, 746 (1995).

Поступила в редакцию 11 января 2020 г.

После доработки 25 марта 2020 г.

Принята к публикации 26 марта 2020 г.