

УДК 532.783

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВОГО ПУЧКА С ВИНТОВОЙ ДИСЛОКАЦИЕЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ФОТОРЕФРАКТИВНОМ ЭФФЕКТЕ В НЖК

И. А. Будаговский¹, А. С. Золотько¹, М. П. Смаев¹, С. А. Швецов^{1,2}

Осуществлена генерация светового пучка с винтовой дислокацией волнового фронта с помощью нематического жидкого кристалла, находящегося под воздействием постоянного электрического поля. Аксиально-симметричная деформация поля директора, необходимая для возникновения такого пучка, возникает вследствие светоиндуцированного снятия экранировки постоянного поля поверхностными электрическими зарядами.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, винтовая дислокация волнового фронта, фоторефрактивный эффект.

Введение. Световые пучки с винтовой дислокацией волнового фронта (ПВД) представляют интерес для микроманипулирования [1, 2], обработки и передачи оптической информации [3], получения изображений астрономических объектов [4]. Такие пучки относятся к свободным модам пространства, характеризуются наличием орбитального углового момента и минимумом интенсивности на оси пучка.

Для получения ПВД используются различные среды, в том числе нематические жидкие кристаллы (НЖК). Нематики являются сильноанизотропными средами, причём направлением оптической оси (директором) можно легко управлять внешними воздействиями. Ячейка с НЖК, имеющая аксиально-симметричную деформацию директора (на оси симметрии при этом будет наблюдаться дефект ориентации молекул), позволяет трансформировать гауссовы пучки в пучки с винтовой дислокацией волнового фронта. В работах [5, 6] предлагается создавать дефекты ориентации в жидкокристаллической ячейке за счет специальной обработки ориентирующих подложек. Для получения ПВД можно использовать естественные дефекты в неориентированном слое

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: smayev@lebedev.ru.

² Московский физико-технический институт, 141700 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9.

НЖК [7], дефекты, возникающие при локальном нагреве световым пучком [8], а также ориентационные дефекты в объеме НЖК, возникающие при сильной фокусировке светового пучка [9].

Аксиально-симметричная деформация поля директора НЖК, необходимая для формирования ПВД, может быть получена при одновременном приложении электрического и светового полей. Так, в [10] использовался гомеотропно ориентированный НЖК с отрицательной низкочастотной анизотропией, на одну из подложек которого был нанесен слой фотопроводника. К ячейке прикладывалось допороговое низкочастотное поле, изначально не приводившее к переориентации директора. Однако при освещении образца в фотопроводнике генерировались заряды и происходило усиление электрического поля до надпорогового значения. Деформация поля директора имела аксиальную симметрию вследствие гауссова распределения световой интенсивности.

В настоящей работе получен световой пучок с винтовой дислокацией волнового фронта при одновременном приложении к гомеотропному НЖК постоянного электрического и светового полей. Аксиально-симметричное поле директора формируется вследствие поверхностного фоторефрактивного эффекта [11–13], обусловленного переориентацией директора за счет частичного снятия экранировки постоянного поля поверхностными зарядами.

Установка и экспериментальные результаты. Использовался нематический жидкий кристалл ЖКМ-1277 гомеотропной ориентации толщиной $L = 100$ мкм. Подложки жидкокристаллической ячейки были покрыты токопроводящим слоем ИТО. Исследования проводились при комнатной температуре.

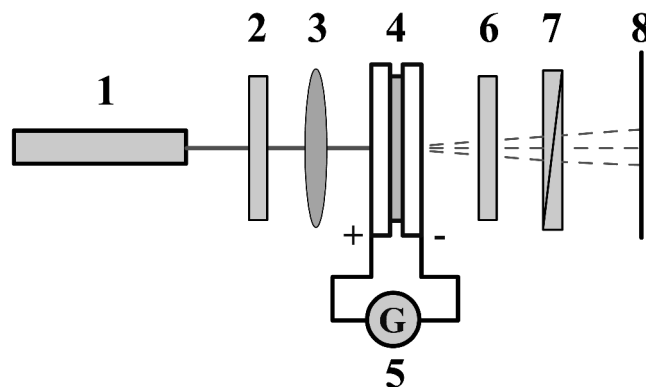


Рис. 1: Схема экспериментальной установки. 1 – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм), 2 и 6 – четвертьволновые пластинки, 3 – линза, 4 – ячейка с нематическим жидким кристаллом, 5 – источник постоянного напряжения, 7 – анализатор, 8 – экран.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Световой пучок линейной поляризации с длиной волны $\lambda = 532$ нм от твердотельного лазера 1 проходил через четвертьволновую пластинку 2, преобразовывающую линейную поляризацию в циркулярную, и фокусировался линзой 3 с фокусным расстоянием $f = 10$ см на ячейке с НЖК 4. К подложкам ячейки прикладывалось постоянное напряжение. За жидкокристаллической ячейкой были установлены четвертьволновая пластинка 6 и анализатор 7. Поперечное распределение интенсивности поляризационных компонент светового пучка наблюдалось на экране 8.

Приложенное к НЖК постоянное электрическое поле экранируется приповерхностными зарядами. В освещаемой области электрическое поле проникает в объём НЖК в соответствии с профилем интенсивности пучка, что приводит к аксиально-симметричной деформации поля директора. При прохождении циркулярно-поляризованного пучка через такую структуру формируется пучок с винтовой дислокацией волнового фронта.

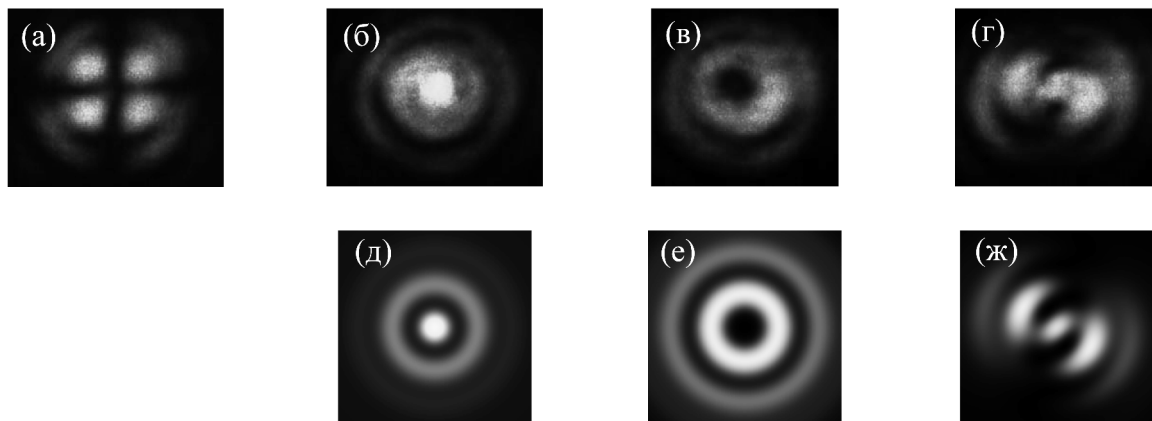


Рис. 2: Экспериментальные ((а)–(г)) и теоретические ((д)–(ж)) распределения интенсивности в дальней зоне после анализатора: (а) в скрещенных поляризаторах (в отсутствие четвертьволновых пластинок), ((б), (д)) – базовая часть излучения, ((в), (е)) – пучок с винтовой дислокацией волнового фронта, ((г), (ж)) – интерференция базовой компоненты пучка и ПВД (промежуточное положение анализатора). Угловой размер картин – 0.02 рад.

При мощности светового пучка $P = 1.5$ мВт и напряжении $U = 2$ В, в отсутствие пластинок 2 и 6 (рис. 1) на экране наблюдалась характерная картина в виде креста (рис. 2(а)). С установленной четвертьволновой пластинкой 2, дающей циркулярную поляризацию из исходной линейной, световой пучок в НЖК частично конвертировался в

ПВД, при этом направление циркулярной поляризации для ПВД изменялось на противоположное. После прохождения пластинки 6 поляризации гауссова пучка и ПВД становились линейными и были расположены в ортогональных плоскостях. Вращая анализатор 7, можно наблюдать распределение интенсивности базовой компоненты (диффрактировавшего на дефекте гауссова пучка, рис. 2(б)), ПВД (рис. 2(в)), а также результат их интерференции (рис. 2(г)). Отметим, что данный эффект наблюдается в широком диапазоне оптических мощностей ($1 \text{ мВт} \leq P \leq 25 \text{ мВт}$) и прикладываемых напряжений ($1 \text{ В} \leq U \leq 4 \text{ В}$).

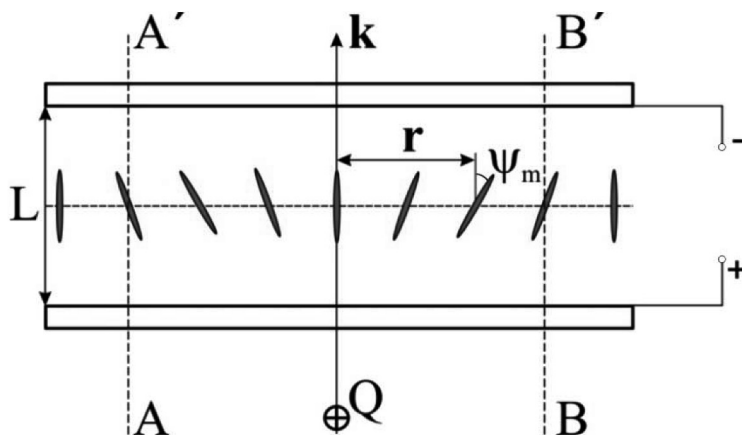


Рис. 3: Переориентация директора в ячейке с НЖК при поверхностном фоторефрактивном эффекте. Проникающее в объём НЖК внешнее постоянное поле моделируется полем положительного точечного заряда Q . AA' и BB' – условные границы светового пучка. ψ_m – угол поворота директора в центральной плоскости НЖК на расстоянии r до оси пучка.

Обсуждение. Поскольку светоиндуцированное снятие экранирования происходит преимущественно на одной подложке (анодной) [13], а степень снятия определяется интенсивностью излучения, то результирующее проникающее поле можно аппроксимировать полем точечного заряда Q , расположенного вблизи анодной поверхности НЖК (рис. 3). Такое поле будет формировать аксиально-симметричное распределение деформации директора в объёме НЖК в соответствии с направлением проникающего электрического поля. Угол ψ_m отклонения директора от исходного направления равен нулю на оси пучка и на его периферии, но принимает ненулевое значение в некоторой окрестности оси пучка.

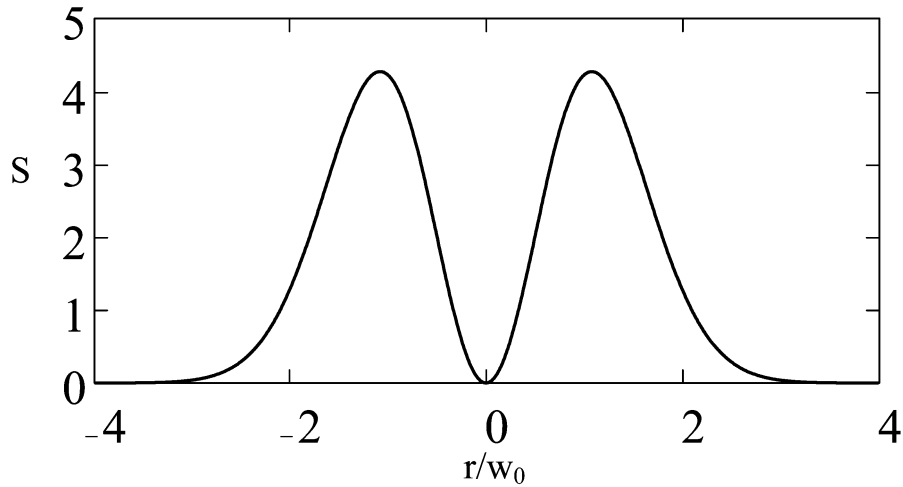


Рис. 4: Распределение дополнительного набега фазы S для необыкновенной компоненты светового поля. w_0 – радиус перетяжки падающего светового пучка.

Расчет поперечного распределения интенсивности проводился с помощью соотношений, приведённых в работе [8]. Эти соотношения связывают распределение интенсивности пучка, прошедшего фазовую пластинку, с профилем фазового набега S в поперечном сечении пучка. Поперечное распределение дополнительного набега фазы, обусловленного деформацией директора в проникающем электрическом поле при локальном светоиндуцированном снятии его экранировки, имеет вид, представленный на рис. 4. Результаты расчетов, приведенные на рис. 2((д)–(ж)), хорошо согласуются с экспериментом.

Заключение. Предложена и реализована методика формирования пучков с винтовой дислокацией волнового фронта с помощью фоторефрактивного эффекта в жидких кристаллах. Необходимое аксиально-симметричное распределение деформации поля директора создавалось в результате переориентации директора НЖК при светоиндуцированном снятии экранировки внешнего постоянного поля.

Авторы благодарны В.Н. Очкину за полезные обсуждения. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00784).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, M. J. Padgett, *Opt. Lett.* **22**, 52 (1997).
- [2] M. Dienerowitz, M. Mazilu, P. J. Reece, et al., *Opt. Express* **16**, 4991 (2008).

- [3] G. Molina-Terriza, J. P. Torres, L. Torner, *Nature Phys.* **3**, 305 (2007).
- [4] G. Foo, D. M. Palacios, G. A. Swartzlander, *Opt. Lett.* **30**, 3308 (2005).
- [5] L. Marrucci, C. Manzo, D. Paparo, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 163905 (2006).
- [6] L. Marrucci, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **488**, 148 (2008).
- [7] C. Loussert, U. Delabre, E. Brasselet, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 037802 (2013).
- [8] И. А. Будаговский, А. С. Золотько, Д. Л. Коршунов и др., *Опт. и спектроск.* **119**, 295 (2015).
- [9] E. Brasselet, *Opt. Lett.* **34**, 3229 (2009).
- [10] R. Barboza, U. Bortolozzo, G. Assanto, et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 143901 (2012).
- [11] P. Pagliusi, G. Cipparrone, *J. Appl. Phys.* **93**, 9116 (2003).
- [12] A. S. Zolot'ko, I. A. Budagovsky, V. F. Kitaeva, et al., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **454**, 407 (2006).
- [13] И. А. Будаговский, А. С. Золотько, М. П. Смаев, М. И. Барник, *ЖЭТФ* **138**, 150 (2010).

Поступила в редакцию 22 апреля 2015 г.