

# Исследование процесса формирования оптических вихрей в ближнем поле локализованных хиральных жидкокристаллических структур на дифракционном фазовом микроскопе

*А. А. Мисюра, А. В. Черных, К. А. Герасимов, Д. Д. Дармороз, Т. Орлова, Н. В. Петров*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе проведено исследование формирования оптических вихрей в образцах хиральных нематических жидких кристаллов, состоящих из ансамблей локализованных солитонных структур. Известно, что такие структуры можно рассматривать как аналог q-пластины, которая используется для формирования вихревых и векторных пучков. В данной работе, с помощью дифракционного фазового микроскопа исследовалась структура светового поля, формируемого локализованными хиральными жидкокристаллическими структурами, расположенными между двумя ахроматическими четвертьволновыми пластинками. В ходе работы были записаны серии цифровых голограмм, из которых были восстановлены фазовые распределения световых пучков с сингулярными точками, то есть обнаружены оптические вихри.

*Ключевые слова:* Оптические вихри, Цифровая голографическая микроскопия, Локализованные жидкокристаллические структуры.

*Цитирование:* Мисюра, А. А. Исследование процесса формирования оптических вихрей в ближнем поле локализованных хиральных жидкокристаллических структур на дифракционном фазовом микроскопе / А. А. Мисюра, А. В. Черных, К. А. Герасимов, Д. Д. Дармороз, Т. Орлова, Н. В. Петров // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 398–401.

## Введение

Жидкие кристаллы сочетают в себе оптические свойства кристаллических твердых тел и текучесть изотропных жидкостей. Они способны формировать чрезвычайно богатый спектр жидкокристаллических текстур с естественно возникающими топологическими дефектами, а также искусственно созданные топологические ориентационные структуры [1]. В тонких пленках хиральных нематических жидких кристаллов наблюдаются метастабильные локализованные солитоны, ориентационная структура которых может сочетать как сингулярные, так и несингулярные особенности [2]. Жидкокристаллические солитоны уже были продемонстрированы как генераторы оптических вихрей и векторных лазерных пучков [1, 3]. В целом известно несколько способов формирования оптических вихрей, однако метод, основанный на использовании топологических солитонов в жидких кристаллах, является особенно привлекательным, так как является неинвазивным. Исследования оптических вихрей в дальней зоне дифракции дали новый толчок в разработке жидкокристаллических дисплеев [4] и электрооптических устройств на основе жидких кристаллов. Однако

исследования структуры и особенностей светового поля в ближней зоне дифракции никогда ранее не проводились.

В работе при помощи фазового цифрового голографического микроскопа производится запись цифровых голограмм пленок хиральных нематических кристаллов с топологическими солитонами, по которым восстановлены фазовые изображения.

### 1. Описание схемы установки

В рассматриваемом дифракционно-фазовом микроскопе [5] (Рис. 1) от диода (LED) излучение с длиной волны 650 нм, проходя через объектив цифрового голографического микроскопа (MO1, MO2), освещает исследуемый образец (OBJ). Далее световой пучок отражается от двух зеркал (M1, M2), проходит через линзу (L1) и попадает на амплитудную решетку (G), генерирующую несколько порядков дифракции, содержащих полную пространственную информацию об образце. Затем осуществляется пространственная фильтрация при помощи 4-f системы, образованной двумя линзами (L2, L3) и пространственным фильтром (SF), который формирует опорную и предметную волны. Нулевой дифракционный порядок претерпевает фильтрацию на круглой апертуре размером 25 мкм и в интерференционном поле выполняет роль опорной волны, первый же, напротив, свободно проходит фильтр через щель шириной в 2 мм и действует как предметная волна; все остальные дифракционные порядки полностью блокируются. Излучение попадает на камеру (CMOS), записывающую результат интерференции опорной и предметной волн.

Для исследования процесса формирования оптических вихрей локализованными жидкокристаллическими структурами оптическая схема была оснащена поляризатором, двумя четвертьволновыми пластинами и анализатором как показано на Рис.1.

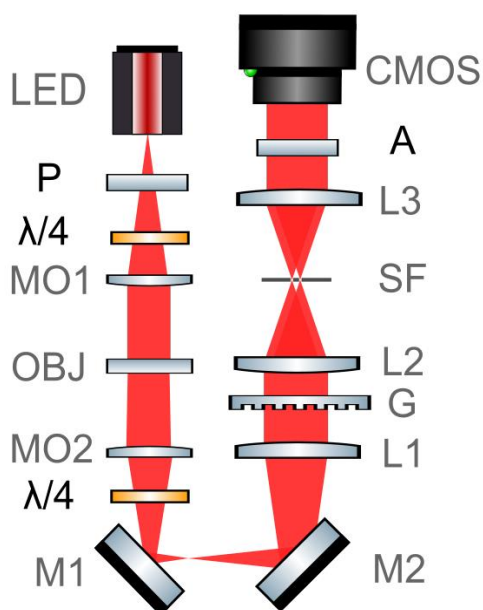


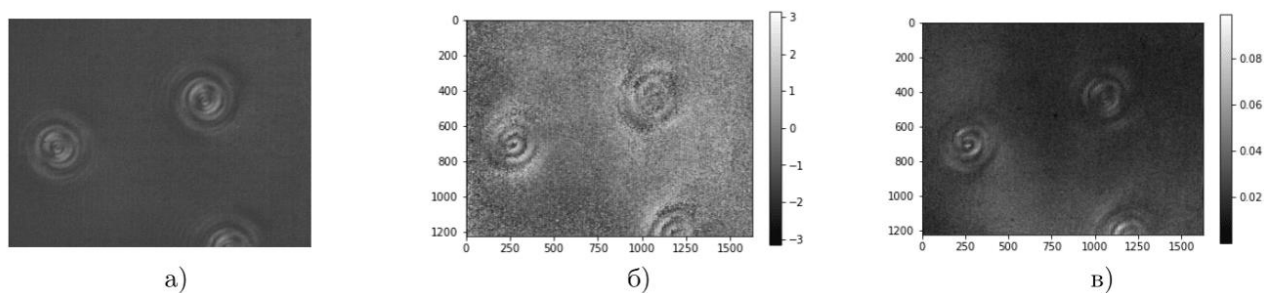
Рис. 1. Схема фазового цифрового голографического микроскопа

## 2. Объект исследования

Хиральный нематический жидкий кристалл был приготовлен допированием нематического жидкого кристалла HPC850600-100 (HCCN) хиральной добавкой S-811 (HCCN). Готовая жидкокристаллическая смесь помещалась в коммерческие жидкокристаллические ячейки толщиной 10 микрон с перпендикулярными условиями сцепления на подложках (E.N.C. Japan). Как известно, в том случае, когда значение шага спирали хирального нематика заметно превышает величину критического шага, определяемого толщиной образца и константами упругости жидкого кристалла, в образце происходит фрустрация холестерической спирали. Однако, если шаг спирали хирального нематика сопоставим с критическим шагом, в жидкокристаллическом образце наблюдается самопроизвольное формирование различных метастабильных хиральных структур, такие как протяженные холестерические “пальцы” и локализованные холестерические сферулиты [6]. В приготовленном нами образце, поляризационные оптические изображения самопроизвольно сформировавшихся локализованных структуры были аналогичны изображениям жидкокристаллических вихревых генераторов [3], и потому были выбраны для дальнейшего исследования их оптических свойств.

## 3. Восстановление фазового изображения объекта

Для восстановления комплекснозначной волны из цифровых голограмм (Рис. 2) был использован метод двойного преобразования Фурье с фильтрацией в частотной плоскости [7]. Сначала производилось вычисление преобразования Фурье, после чего к Фурье-спектру применялась пространственно-частотная фильтрация спектра совместно с центрированием первого порядка дифракции, затем выполнялось обратное преобразование Фурье.



**Рис. 2.** Цифровая голограмма исследуемого объекта (а), восстановленное фазовое (б) и амплитудное (в) изображения объекта

На восстановленных фазовых распределениях присутствует набег вокруг центра сферулита в  $4\pi$  радиан, что свидетельствует о наличии оптических вихрей с двойным топологическим зарядом в поле исследуемого образца.

## Заключение

В работе с помощью метода дифракционной фазовой микроскопии были зарегистрированы и исследованы волновые фронты, которые формируются локализованными хиральными

жидкокристаллическими структурами. На образец попадает световой пучок с круговой поляризацией. В одной из равных круговых компонент формируется оптический вихрь. На полученных восстановленных фазовых изображениях заметно высокое влияние шума, которое в дальнейшем планируется также минимизировать при помощи усреднения фаз.

### Список источников

- [1] **Papič M.** Topological liquid crystal superstructures as structured light lasers / M. Papič, U. Murb, K. P. Zuhail, M. Ravnika, I. Mušević, M. Huma // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2021. — Vol 118. — № 49. — P. e2110839118.
- [2] **Ackerman P. J.** Diversity of knot solitons in liquid crystals manifested by linking of preimages in torons and hopfions / P. J. Ackerman, I. I. Smalyukh // *Journal of Optics*. — 2017. — Vol 7. — № 1. — P. 011006.
- [3] **Yang B.** Arbitrary vortex arrays realized from optical winding of frustrated chiral liquid crystals / B. Yang, E. Brasselet // *Journal of Optics*. — 2013. — Vol 15. — № 4. — P. 044021.
- [4] **Coles H. J.** Liquid crystal ‘blue phases’ with a wide temperature range / H. J. Coles, M. N. Pivnenko // *Nature*. — 2005. — Vol 436. — № 7053. — P. 997–1000.
- [5] **Bhaduri B.** Diffraction phase microscopy: principles and applications in materials and life sciences / B. Bhaduri, C. Edwards, H. Pham, R. Zhou, T. H. Nguyen, L. L. Goddard, G. Popescu // *Advances in Optics and Photonics*. — 2014. — Vol 6. — №1. — P. 57–119.
- [6] **Oswald P.** Nematic and Cholesteric Liquid Crystals Concepts and Physical Properties Illustrated by Experiments / P. Oswald, P. Pieranski. — CRC press, 2005. — 618 p.
- [7] **Takeda M.** Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review / M. Takeda // *Applied Optics*. — 2013. — Vol. 52. — №. 1. — P. 20-29.

## Investigation of the formation of optical vortices in the near field of localized chiral liquid crystal structures on a diffraction phase microscope

*A. A. Misura, A. V. Chernykh, K. A. Gerasimov, D. D. Darmoroz, T. Orlova, N. V. Petrov*  
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The study investigates the formation of optical vortices in samples of chiral nematic liquid crystals composed of ensembles of localized soliton structures. It is known that such structures can be considered as an analog of a q-plate, which is used to generate vortex and vector beams. In this study, the structure of the light field formed by localized chiral liquid crystalline structures located between two achromatic quarter-wave plates was investigated using a diffraction phase microscope. Series of digital holograms were recorded, from which the phase distributions of the light beams with singular points, i.e., optical vortices, were reconstructed.

*Keywords:* Optical vortices, Digital holographic microscopy, Localized liquid crystalline structures.