

А.Ю. Костылев, И.В. Ильина, Т.Ю. Черезова, А.В. Кудряшов

## Формирование вихревых пучков управляемыми фазовыми элементами

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Поступила в редакцию 10.04.2007 г.

Экспериментально исследована возможность формирования лазерных пучков с винтовыми дислокациями волнового фронта при помощи управляемых фазовых оптических элементов, имеющих непрерывный профиль поверхности: биморфного адаптивного зеркала и электрически управляемого жидкокристаллического модулятора.

### Введение

При рассеянии пучка от шероховатой поверхности, при распространении пучка на достаточное расстояние в турбулентной атмосфере оптическое поле пучка приобретает вид спекл-структур. Для таких полей характерным является наличие изолированных точек в поперечной плоскости, где интенсивность обращается в нуль, фаза не определена, а интегрирование градиента фазы по замкнутому контуру, окружающему такую точку ветвления, дает отличную от нуля циркуляцию.

Основное свойство винтовой дислокации состоит в том, что обход оси оптического вихря по любому замкнутому контуру, не охватывающему другой оптический вихрь, приводит к изменению фазы на  $2\pi m$ . Целочисленная величина  $m$  называется топологическим зарядом вихря. Сочетание циркулярного и поступательного движения энергии электромагнитной волны приводит к образованию геликоидальной поверхности равной фазы, так называемой винтовой дислокации волнового фронта. При этом волновой фронт имеет везде гладкую поверхность, за исключением оси геликоида [1–4]. Типичным примером оптического вихря является «бубликообразная» мода Лагерра–Гаусса ( $LG_0^{-1}$ ) лазерного резонатора.

Наличие винтовых дислокаций в волновом фронте излучения заметно снижает эффективность адаптивных систем управления излучением. Традиционные методы коррекции волнового фронта для указанных задач являются фактически бессильными, поскольку разработка корректоров, способных воспроизводить винтовые дислокации, является сложной научной и технической задачей.

С другой стороны, лазерные пучки с винтовыми дислокациями могут быть использованы для решения ряда практически важных задач. Они могут применяться для создания оптических ловушек, оптических манипуляторов, оптических пинцетов, в системах коммуникации [5, 6]. Поэтому разра-

ботка методов как формирования, так и компенсации винтовой дислокации волнового фронта лазерных пучков является важной задачей. Однако традиционные фазовые корректоры, такие, например, как гибкие биморфные зеркала [7, 8] и жидкокристаллические (ЖК) модуляторы [9], имеют неразрывную поверхность, поэтому формирование с их помощью разрывных фазовых профилей является предметом, требующим специального отдельного исследования. Такое исследование и является предметом данной статьи.

### 1. Гибкое биморфное адаптивное зеркало и жидкокристаллический транспарант — элементы для формирования вихревых пучков

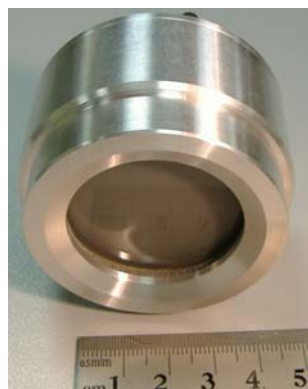
В настоящее время известны различные способы формирования вихревых пучков. Например, в работах [10, 11] предлагается для этой цели использовать амплитудные голографические элементы. Однако эффективность голографических элементов значительно снижается при наличии флуктуаций параметров падающего лазерного излучения. Кроме того, часто бывает необходимым динамическое изменение волнового фронта излучения. Для этих задач удобно использовать управляемые фазовые оптические элементы, одним из которых является гибкое биморфное зеркало [7, 8]. Биморфное зеркало состоит из склеенных между собой толстой стеклянной или металлической подложки и одного или нескольких тонких пьезокерамических дисков с электродами. Под действием обратного поперечного пьезоэффекта происходит расширение или сжатие пьезокерамической пластины и возникает изгибающий момент, деформирующий зеркало.

Воспроизведение разрывного винтового волнового фронта вихревого пучка модальным биморфным корректором, имеющим непрерывный профиль

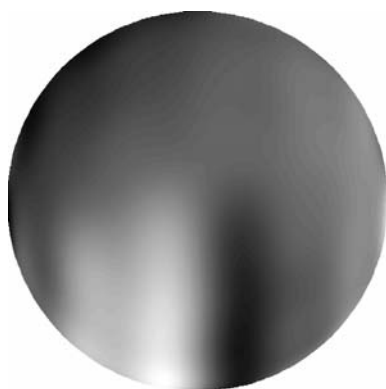
поверхности, является затруднительным. Поэтому чтобы имитировать разрывную поверхность таким корректором с наибольшей точностью, было специально рассчитано и создано гибкое зеркало с сеткой электродов (рис. 1). Профиль поверхности зеркала, необходимый для формирования оптического вихря (рис. 1, *б*), имеет согласно расчету амплитуду деформации 0,633 мкм и достигается при подаче напряжений +300 В и –300 В на четные и нечетные электроды зеркала соответственно.



*a*



*б*



*в*

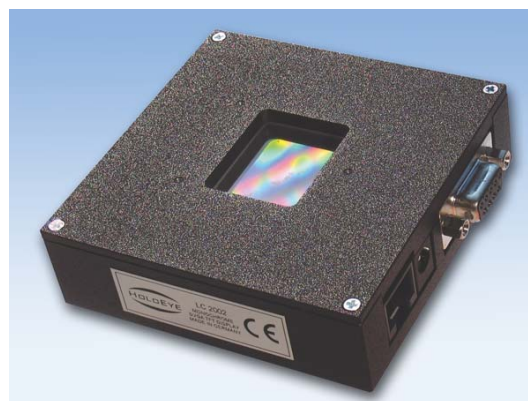
Рис. 1. Конфигурации электродов биморфного зеркала (*a*), его фотография (*б*) и профиль поверхности зеркала (изображенный в градациях серого цвета), необходимый для формирования оптического вихря в дальнем поле (*в*)

Гибкое зеркало имеет непрерывную поверхность, однако в том месте, где должен наблюдаться

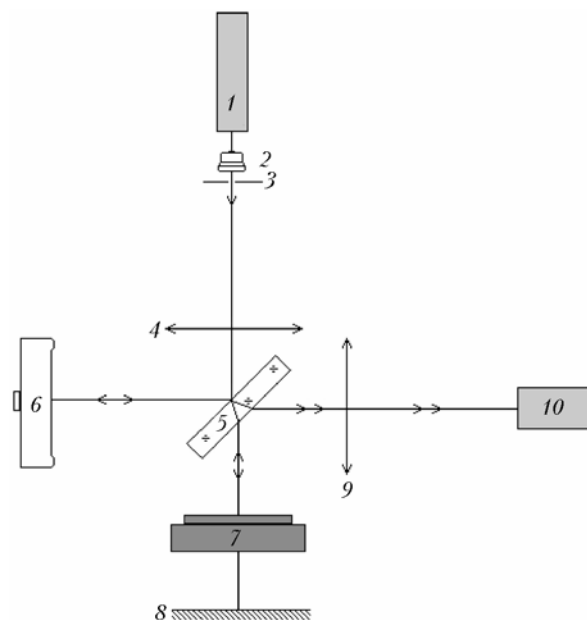
разрыв, виден довольно резкий локальный наклон поверхности. В настоящей статье решалась задача экспериментальной проверки возможности формирования оптических вихрей изготовленным зеркалом.

Применение биморфных корректоров эффективно для управления лазерным излучением высокой мощности. Для управления излучением низкой мощности удобно использовать ЖК-модулятор. Жидкокристаллический управляемый транспарант является в настоящее время одним из широко используемых оптических элементов для управления и коррекции лазерного излучения [9] благодаря их простоте управления, низкой потребляемой энергии.

Используемый жидкокристаллический электрически управляемый модулятор Holoeye-SLM-LC-2002 (рис. 2, *a*) представляет собой фазовый оптический элемент, способный изменять волновой фронт проходящего через него лазерного излучения.



*a*



*б*

Рис. 2. Фотография ЖК-модулятора Holoeye-SLM-LC-2002 (*a*) и схема экспериментальной установки для создания и обнаружения винтовой дислокации волнового фронта (*б*)

Модулятор SLM-LC-2002 представляет собой одноосный нематический жидкий кристалл, находящийся между прозрачными электродами, один из которых сплошной, а второй имеет вид ячеек. Принцип действия такого модулятора следующий. Световое излучение распространяется вдоль главной оптической оси жидкого кристалла. При приложении к электродам напряжения оси молекул жидкого кристалла переориентируются и вследствие анизотропии диэлектрической проницаемости изменяется показатель преломления для проходящего через рабочую среду лазерного излучения. Таким образом, прикладывая различные напряжения к различным электродам ЖК-модулятора, можно управлять фазовыми задержками различных участков лазерного пучка, проходящего через ЖК-модулятор. Управление ЖК-модулятором осуществляется с помощью специальной программы управления (входящей в комплект поставки). В рамках этой программы черно-белый видеосигнал VGA-или SVGA-формата с помощью специального преобразователя, включенного в комплект поставки, преобразуется в электрический сигнал, прикладываемый к управляющим электродам модулятора. При этом черная точка экрана соответствует минимальной фазовой задержке жидкокристаллической ячейки, а белая точка — максимальной. Используемый модулятор имеет спецификации и технические характеристики, представленные ниже.

Модель ЖК-матрицы	SONY LCX016AL-6
Размеры рабочей области	26,6 × 20,0 мм (1,3")
Разрешение	832 × 624
Размер пикселя	32 мкм
Максимальная частота работы	60 Гц
Максимальная фазовая задержка	2π на длине волны 532 нм
Доля активной поверхности по площади	85%
Внешние размеры	82 × 82 × 23 мм
Градации фазовой задержки	256 значений (8 бит)
Форматы управляющего сигнала	VGA, SVGA

## 2. Результаты экспериментов по формированию вихревых пучков

Рассмотрим экспериментальные результаты формирования лазерных пучков с винтовой дислокацией волнового фронта при помощи электрически управляемого ЖК-модулятора и биморфного адаптивного зеркала.

Для регистрации волнового фронта вихревого пучка использовался интерферометр Майкельсона. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2,б. Лазерный пучок He—Ne-лазера (ЛГН-303) 1 после прохождения микрообъектива (20х) 2, диафрагмы (10 мкм) 3 и коллимирующей линзы 4 падает на делительную пластинку 5 интерферомет-

ра Майкельсона. В качестве одного из зеркал интерферометра используется гибкий биморфный корректор 6. В другое плечо интерферометра вставляется ЖК-модулятор 7. Линза 4 может быть установлена или демонтирована из оптической схемы для наблюдения интерференционной картины в коллимированных или соответственно в расходящихся пучках. Максимальная фазовая задержка ЖК-модулятора, установленного на двойной проход, приблизительно равна длине волны излучения используемого He—Ne-лазера ( $\lambda = 638$  нм). Выходное излучение из интерферометра фокусируется линзой 9 с фокусным расстоянием 300 мм на матрицу ПЗС-камеры 10. Линза 9 использовалась для согласования апертуры пучка, выходящего из интерферометра, с размером входного окна ПЗС-камеры 10. Кроме того, линза 9 позволяла наблюдать в фокальной плоскости распределение интенсивности пучка в дальнем поле.

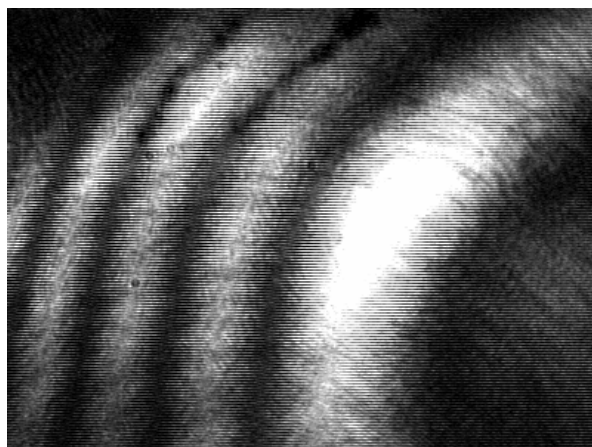
Эксперимент с гибким биморфным зеркалом проводился в коллимированных пучках (линза 4 на рис. 2,б установлена). Как уже говорилось ранее, гибкое зеркало неидеально воспроизводит вихревое распределение фазы (см. рис. 1,в). Из рис. 1,в видно, что разрыв в распределении фазы воспроизводится зеркалом более сглаженно, чем это необходимо для идеального получения вихревой фазы.

Как показал эксперимент, ветвление полосы интерференционной картины можно было наблюдать только в фокальной плоскости линзы 9 (см. рис. 2,б). Напряжения, которые при этом необходимо подать, равны  $\pm 300$  В и на четные и нечетные управляющие электроды зеркала соответственно. Для наблюдения фокального пятна с помощью 60-кратного объектива строилось увеличенное его изображение на поверхности окна ПЗС-камеры 10 (см. рис. 2,б). Из рис. 3 видно, что при подаче управляющих напряжений на электроды зеркала возникает ветвление интерференционной полосы (рис. 3,б), что свидетельствует об образовании винтовой дислокации волнового фронта.

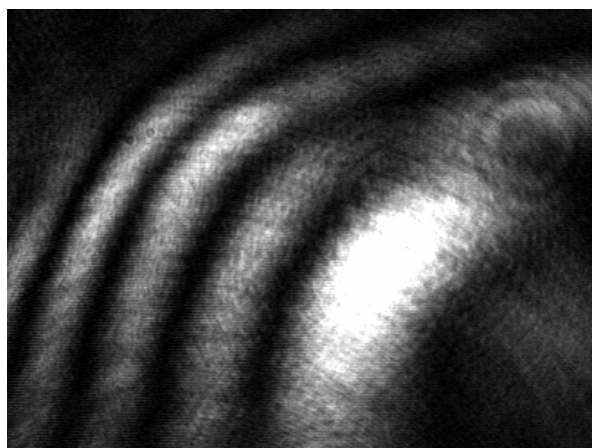
При помощи ЖК-модулятора также проводилось формирование винтовых дислокаций волнового фронта разных порядков. Сформированные жидкокристаллическим модулятором интерференционные картины исследовались в расходящихся и коллимированных пучках. На рис. 4,а–з слева показаны видеосигналы, подаваемые на блок управления жидкокристаллического модулятора, и справа — соответствующие им интерференционные картины: для формирования лазерных пучков с винтовой дислокацией волнового фронта нулевого (нет винтовой дислокации) (а), первого (б), второго (в), третьего (г), четвертого (д), пятого (е), двенадцатого (ж) и тридцать второго порядков (з).

При интерференции пучков, имеющих расходящийся волновой фронт, интерференционная картина представляет собой набор концентрических колец (рис. 4,а). В этом случае наличие винтовой дислокации приводит к образованию одной раскру-

чивающейся спирали в интерференционной картине для оптического вихря первого порядка, в виде двух раскручивающихся спиралей для оптического вихря второго порядка и т.д.



*a*

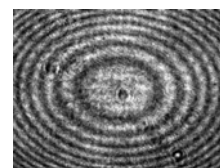


*б*

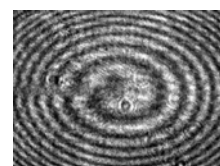
Рис. 3. Интерференционные картины в отсутствие (*a*) и при подаче (*б*) напряжений  $\pm 300$  В на управляющие электроды зеркала

При установке между диафрагмой 3 и делительной пластинкой 5 (см. рис. 2, *б*) коллимирующей линзы 4 наблюдались интерференционные картины в коллимированных пучках (рис. 4, *и*), которые показаны на рис. 4, *к, л*. На рис. 4, *и* показана интерференционная картина, полученная в отсутствие сигнала на ЖК-модуляторе. При подаче управляющего сигнала (рис. 4, *б* слева) образовалась интерферограмма (рис. 4, *к*), на которой видно ветвление интерференционной полосы, что означает наличие винтовой дислокации первого порядка. На рис. 4, *л* показана интерференционная картина, возникающая при подаче на ЖК-модулятор сигнала рис. 4, *в*. На этой интерферограмме видно ветвление двух полос, что соответствует оптическому вихрю второго порядка.

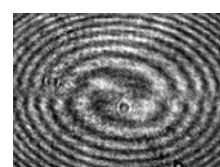
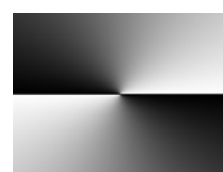
Нет сигнала



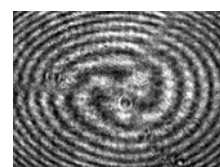
*a*



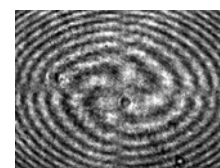
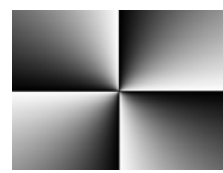
*б*



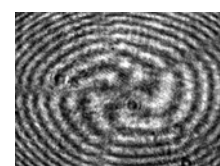
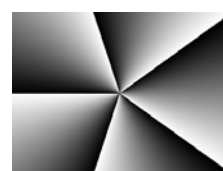
*в*



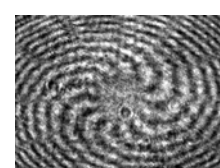
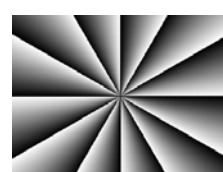
*г*



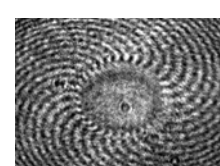
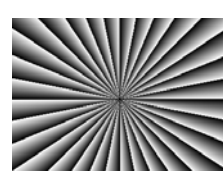
*д*



*е*



*ж*



*з*

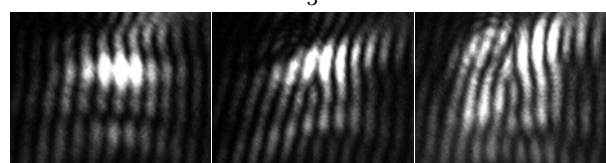


Рис. 4. Видеосигналы и соответствующие им интерференционные картины

## Заключение

Экспериментально продемонстрирована возможность формирования вихревых пучков с помощью управляемых фазовых транспарантов, имеющих сплошной профиль поверхности. С помощью управляемого нематического жидкокристаллического модулятора с пространственным разрешением  $800 \times 600$  удалось сформировать вихревые пучки 1, 2, 3, 4, 5, 12, 32-го порядков. Также экспериментально показана возможность формирования вихревого пучка 1-го порядка с помощью гибкого биморфного зеркала.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ № 2631 «Адаптивная оптическая система для фазовой коррекции лазерных пучков с винтовыми дислокациями волнового фронта».

1. *Fried D.L.* Branch point problem in adaptive optics // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1998. V. 15. N 10. P. 2759–2786.
2. *Aksenov V., Banakh V., Tikhomirova O.* Potential and Vortex Features of Optical Speckle Fields and Visualization of Wave-Front Singularities // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. Is. 21. P. 4536–4540.
3. *Aksenov V.P., Tikhomirova O.V.* Theory of singular-phase reconstruction for an optical speckle field in the turbulent atmosphere // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2002. V. 19. N 2. P. 345–355.
4. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П.* Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 250 с.
5. *Gahagan K.T., Swartzlander G.A.* Trapping of low-index microparticles in an optical vortex // *J. Opt. Soc. Amer. B.* 1998. V. 15. N 2. P. 524–534.
6. *Gahagan K.T., Swartzlander G.A.* Simultaneous trapping of low-index and high-index microparticles, observed with in an optical vortex trap // *J. Opt. Soc. Amer. B.* 1999. V. 16. N 4. P. 533–539.
7. *Kudryashov A.V., Shmalhausen V.I.* Semipassive bimorph flexible mirrors for atmospheric adaptive optics applications // *Opt. Eng.* 1996. V. 35. N 11. P. 3064–3073.
8. *Cherezova T.Yu., Kaptsov L.N., Kudryashov A.V.* CW industrial rod YAG:Nd<sup>3+</sup> laser with an intracavity active bimorph mirror // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. N 15. P. 2554–2561.
9. *Kudryashov A.V., Gonglewski J., Browne S., Highland R.* Liquid crystal phase modulator for adaptive optics. Temporal performance characterization // *Opt. Comm.* 1997. V. 141. N 5–6. P. 247–252.
10. *Баженов В.Ю., Васнецов М.В., Соскин М.С.* Лазерные пучки с винтовыми дислокациями волнового фронта // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 52. Вып. 8. С. 1037–1039.
11. *Heckenberg N.R., McDuff R., Smith C.P., Rubinsztein-Dunlop H., Wegener M.J.* Laser beams with phase singularities // *Opt. and Quantum. Electron.* 1992. V. 24. N 9. P. 951–962.

*A.Yu. Kostylev, I.V. Il'ina, T.Yu. Cherezova, A.V. Kudryashov.* **Generation of vortex beams with the help of controllable phase elements.**

A possibility of generation of laser beams with wave front vortex dislocations by means of controllable phase optical elements having a continuous surface profile: bimorph adaptive mirror and electrically controllable liquid-crystal modulator, has been studied experimentally.