

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВРАЩЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЖК ПМС HOLOEYE NEO-1080P

© 2015 Д.В. Прокопова^{1,2}, Е.Н.Воронцов¹, Н.Н. Лосевский¹, Е.В. Разуева¹

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

² Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 05.02.2015

Описаны результаты экспериментов по формированию вращающихся световых полей, представляющих интерес для определения глубины залегания наноразмерных излучающих частиц. Формирование полей осуществлялось с помощью фазового пространственного ЖК модулятора HOLOEYE NEO-1080. Реализованы два типа двухлепестковых световых полей с различными параметрами вращения, фазовые распределения для которых получены на основе оптики спиральных пучков.
Ключевые слова: световые поля с вращением, спиральные пучки, пространственный модулятор света.

1. ВЕДЕНИЕ

В последнее время большой интерес представляет изучение световых полей, вращающихся при распространении. Это обусловлено тем, что такие поля можно использовать для расширения функциональных возможностей оптических систем манипуляции микрообъектами и в микроскопии для определения глубины залегания наноразмерных излучающих частиц. Для последней задачи необходимо, чтобы оптическая отображающая система формировала изображение точечного источника, вид которого зависел бы от расстояния до источника. В ряде работ [1,2] для этого предлагается использовать специальные фазовые оптические фильтры, которые рассчитывают на основе оптики вращающихся световых полей. Изображения точечного источника, полученные с помощью таких фильтров, представляют собой пары световых пятен (двухлепестковые пятна), ориентация которых в плоскости изображения связана с пространственным положением источника.

В работе проводится поиск фазовых распределений, с помощью которых могут быть сформированы двухлепестковые вращающиеся световые поля. Рассмотрены два способа получения фазовых масок. В первом в качестве исходного поля рассматривается суперпозиция мод Лагерра-Гаусса с параметром вращения $\theta_0 = -2$. Во втором способе за основу взят спиральный пучок с параметром вращения $\theta_0 = 4$, состоящий из двух гауссовых пучков, сдвинутых относительно друг друга. Экспериментально реализованы световые поля с вращением.

Прокопова Дарья Владимировна, студентка 4 курса кафедры оптики и спектроскопии, инженер.

E-mail: prokopovadv@gmail.com

Евгений Николаевич Воронцов, кандидат физико-математических наук, инженер. E-mail: vorontsov2005@rambler.ru

Николай Николаевич Лосевский, научный сотрудник.

E-mail: losevsky@fan.smr.ru

Евгения Вадимовна Разуева, младший научный сотрудник.

E-mail: evge-nia.razueva@yandex.ru

2. ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВРАЩЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ЖК ПМС

2.1 Определение глубины залегания объекта с помощью световых полей с вращением.

Принципиальная схема

Для того чтобы определить глубину залегания источника, необходимо модифицировать передаточную функцию оптической системы. Точечный источник должен отображаться в виде пятна, распределение интенсивности в котором зависит от глубины залегания источника. Модификацию передаточной функции оптической системы можно произвести, введя в систему фазовый фильтр.

Рассмотрим некоторый образец толщины d (рис. 1), в котором находятся светящиеся точечные объекты. Пусть два объекта А и В находятся на расстоянии Δz друг от друга. Оптическая система строит увеличенные изображения этих объектов в плоскости регистрации. Расстояние между изображениями точек равно Δl .

Если оптическая система преобразует изображение точечного источника в распределение интенсивности, вращающееся при распространении вдоль оси Z то, зная заранее зависимость азимутального угла поворота светового распределения от координаты Z, и используя соотношение

$$\Delta l = \Gamma^2 \cdot \Delta z, \quad (1)$$

где Γ – поперечное увеличение оптической системы, можно по углу поворота светового пятна в плоскости регистрации определить глубину залегания светящегося объекта.

2.2 Методы получения фазового элемента

С точки зрения дифракционной оптики фазовые фильтры с рассмотренными выше свойствами имеют функцию рассеяния точки,

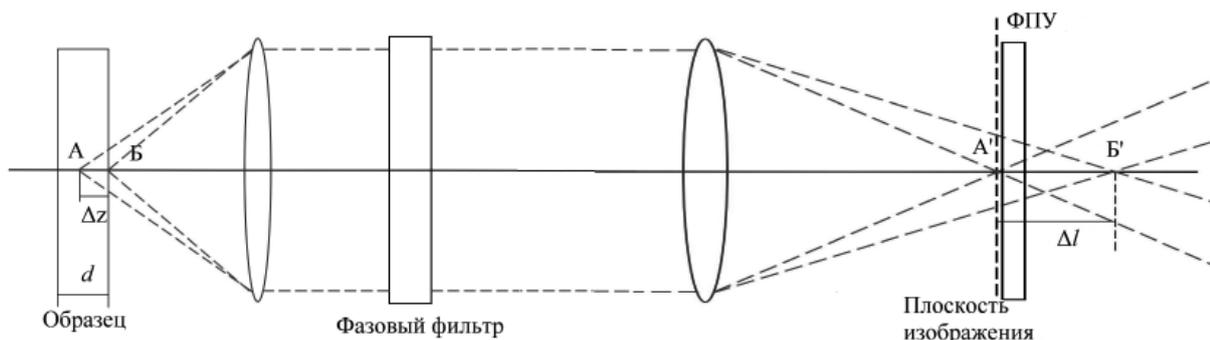


Рис. 1. К определению $\Delta\varphi$ как функции $\Delta\varphi = \Delta\varphi(\Delta z)$

являющуюся вращающимся световым полем. Поэтому задача расчета данных фазовых фильтров сводится к получению дифракционного элемента, формирующего световое поле с вращением, интенсивность которого представляет собой структуру из двух световых пятен.

Оптика спиральных пучков света предоставляет возможность для выбора фазы на основе аналитического, последовательного подхода. Это обусловлено тем, что теоретическое описание данного класса полей позволяет находить пучки с заранее известными распределениями интенсивности и характеристиками поворота при распространении [3]. Угол поворота θ спирального пучка в плоскости, расположенной на расстоянии z от исходной, определяется выражением

$$\theta(z) = \theta_0 \arctan\left(\frac{2z}{kw^2}\right), \quad (2)$$

где k – волновое число, w – параметр поперечного размера пучка, θ_0 – параметр пучка, определяющий скорость вращения пучка при распространении. Полный угол поворота пучка в зоне Френеля составляет

$$\theta = \theta_0 \frac{\pi}{2}.$$

Так как глубина залегания частицы имеет небольшую величину, интерес представляют быстро вращающиеся световые пучки.

В данной работе для расчета фазовых фильтров использовалось два типа спиральных пучков. Первый из них представляет собой пучок с параметром вращения $\theta_0 = 4$, состоящий из двух гауссовых пучков, сдвинутых относительно друг

друга. Как показывают численные эксперименты, в этом случае в качестве фазового элемента достаточно использовать фазу данного спирального пучка. Вид рассчитанного дифракционного элемента показан на рис. 2(б). Вид поля, формируемого дифракционным элементом в пространстве, представлен на рис. 3(а).

Второй тип спиральных пучков представлял собой сумму пучков Лагерра-Гаусса, индексы которых выбраны таким образом, чтобы параметр вращения был равен $\theta_0 = -2$. В данном случае применялась специальная итерационная процедура расчета фазового элемента, за основу которой был принят метод, описанный авторами [1], а в качестве начального распределения фазы выбрана фаза данного спирального пучка. Вид рассчитанного дифракционного элемента показан на рис. 2(г). После 6 итераций качественного улучшения структуры интенсивности поля не наблюдалось. Вид поля, формируемого дифракционным элементом в пространстве, представлен на рис. 3(б).

2.3 Экспериментальная реализация

Для модификации передаточной функции отображающей системы необходимо внести в систему фазовый фильтр. Фильтр представляет собой дифракционный оптический элемент (ДОЭ), который можно изготовить различными способами: методом литографии на стекле, реализовать на слое бихромированной желатины, использовать многоэлементный жидкокристаллический фазовый пространственный модулятор света (ЖК ПМС). Несмотря на то, что ЖК ПМС по дифракционной эффективности уступает первым двум

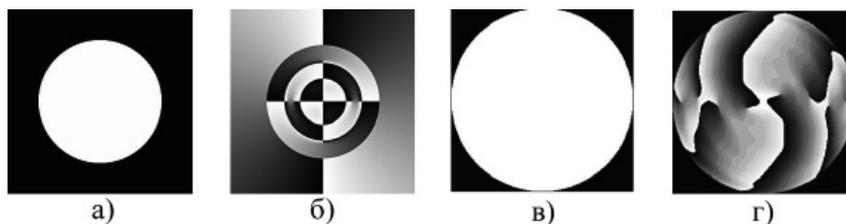


Рис. 2. Интенсивность в плоскости дифракционного элемента и его фаза: (а,б) – для фазового элемента на основе спирального пучка с параметром вращения $\theta_0 = 4$; (в,г) – для дифракционного элемента, рассчитанного итерационным методом после 6 итераций

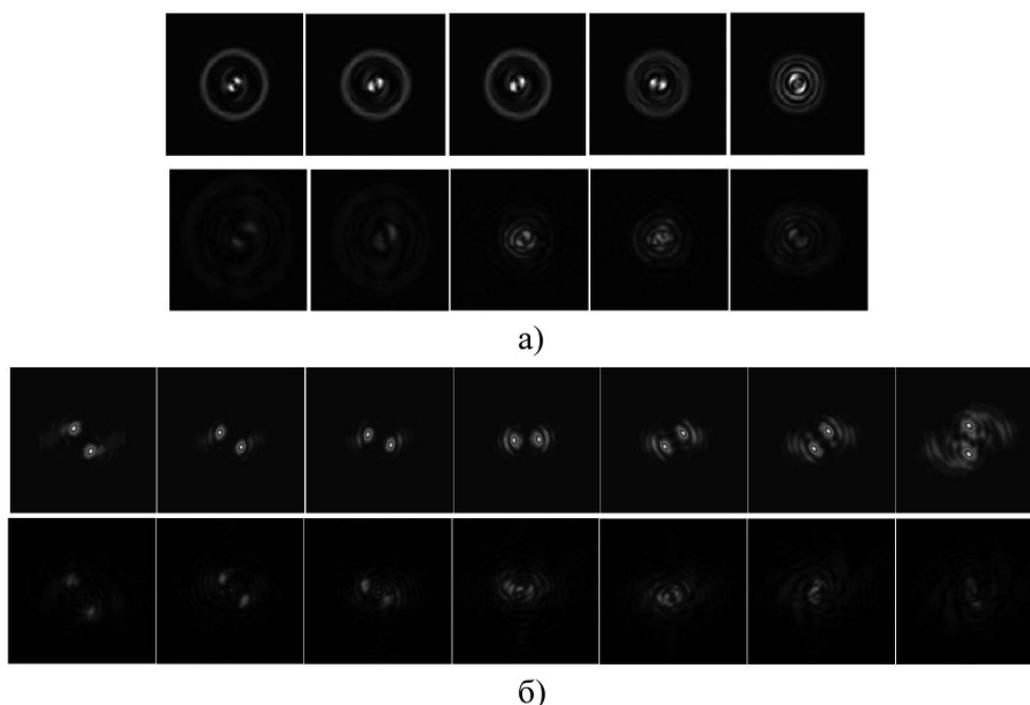


Рис. 3. Распределения интенсивности сформированных полей в сечениях перпендикулярных оси Z :
 а – фазового элемента на основе спирального пучка с параметром вращения $\theta_0 = 4$;
 б – для дифракционного элемента, рассчитанного итерационным методом, после 6 итераций.
 Верхний ряд - рассчитанные распределения интенсивности, нижний - экспериментально полученные

способам создания дифракционного элемента, он обладает возможностью перестраиваться.

Поэтому, для создания фазового фильтра в настоящей работе использовался многоэлементный жидкокристаллический фазовый пространственный модулятор света HOLOEYE NEO-1080P. Основные характеристики устройства следующие: количество управляемых элементов: 1920×1080 пикселей, шаг пикселей: 8 мкм, размер активной области: $15,36 \times 8,64$ мм; количество градаций фазы: 256 (8 bit); глубина фазовой модуляции: 2π ; оптический режим: отражающий; максимальная частота обновления: 60 Гц; максимальная допустимая интенсивность освещения: 2 Вт/см^2 .

Для формирования и исследования данных световых полей была создана экспериментальная установка. Источником излучения являлся твердотельный лазер (мощность до 50 мВт, $\lambda = 532 \text{ нм}$), параллельный пучок от которого направлялся на многоэлементный жидкокристаллический фазовый пространственный модулятор света HOLOEYE NEO-1080P.

Исследуемые световые поля формировались путем подачи соответствующего рассчитанного фазового распределения на пространственный модулятор света. Далее полученное поле с вращением фокусировалось. Сформированное распределение интенсивности и его изменение вдоль оси Z фиксировалось с помощью горизонтального микроскопа и цифровой камеры. Перемещением микроскопа вдоль оптической

оси системы обеспечивалось фиксирование поля в различных сечениях по оси Z .

Результаты серии экспериментов позволили сравнить расчетные и экспериментальные распределения интенсивности сформированных полей (рис. 3), а также установить зависимость угла поворота распределения интенсивности сформированных полей в сечениях перпендикулярных оси Z от расстояния до перетяжки (рис. 4).

Как видно из рисунков, поведение экспериментально сформированных световых пучков при распространении в пространстве совпадает с поведением расчетных. Экспериментально полученная зависимость угла поворота распределения интенсивности в плоскости перпендикулярной оси Z также согласуется с расчетной. Для фазового элемента на основе спирального пучка с параметром вращения $\theta_0 = 4$ не наблюдается изменения зависимости вращения распределения интенсивности при изменении площади освещающего пучка в два раза. Однако, следует отметить, что вблизи фокуса наблюдается сильное искажение в распределении интенсивности в плоскости перпендикулярной оси Z , как для первого, так и для второго метода расчета фазовых фильтров. Это связано, по-видимому, с высокой чувствительностью данной области к aberrациям оптической системы, формирующей изображение. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

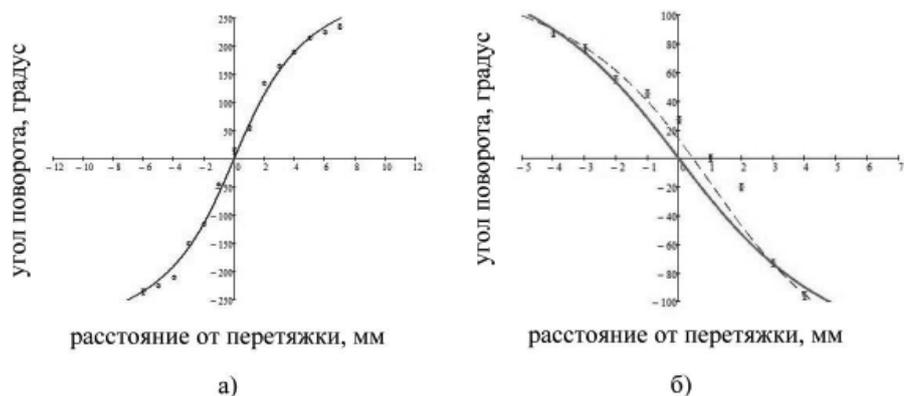


Рис. 4. Зависимость угла поворота распределения интенсивности сформированных полей в сечениях перпендикулярных оси Z от расстояния до перетяжки:

а – для фазового элемента на основе спирального пучка с параметром вращения $\theta_0 = 4$;
 б – для дифракционного элемента, рассчитанного итерационным методом, после 6 итераций.
 Экспериментальные точки, пунктирная линия – аппроксимация экспериментальных данных.
 Толстая линия – теоретическая зависимость

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментальной реализации с помощью ЖК ПВМС HOLOEYE HEO-1080P световых полей с вращением, представляющих интерес для определения глубины залегания наноразмерных излучающих частиц. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о целесообразности использования исследованных полей в высокоразрешающей 3D микроскопии.

Авторы выражают благодарность Светлане Павловне Котовой за постановку интересной задачи и постоянный интерес к работе, а также Владимиру Геннадьевичу Волостникову за ценные советы и замечания.

Работа выполнена при поддержке Программы ОФН РАН «Фундаментальные аспекты физики и технологии полупроводниковых лазеров как основных элементов фотоники и квантовой электроники».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavani R.P., Piestun R. High-efficiency rotating point spread functions// Optics express. 2008. Vol. 16, № 5.
2. A bisected pupil for studying single-molecule orientational dynamics and its application to three-dimensional super-resolution microscopy / A. Backer, M. Backlund, A. von Diezmann, S. Sahl, W.E. Moerner// Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104.
3. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Спиральные пучки света// Успехи физических наук. 2004. т.174, № 12. С.1273-1300.
4. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков// М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 184 с.
5. Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами / Е.Г. Абрамочкин, К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников, А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, Е.В. Разуева // Известия РАН (серия физическая). 2008. Т.72, №1.С. 76-79.

THE LCD SLM HOLOEYE HEO-1080P-ASSISTED SIMULATION OF LIGHT FIELDS WITH THE INTENSITY ROTATION

© 2015 D.V. Prokopova^{1,2}, E.N. Vorontsov¹, N.N. Losevsky¹, E.V. Razueva¹

¹ The Lebedev Physical Institute (Samara Branch)

² Samara State University

The results described were obtained in the experiments on shaping of the rotative light fields being of interest for the problems of estimation of the depth of occurrence of nano-size radiating particles. A phase spatial light LCD modulator HOLOEYE HEO-1080 was used for the fields shaping. The two types of bidirectional light fields with various rotation parameters were obtained. And the phase distributions of the fields were achieved on the basis of the spiral beams optics.

Key words: rotative light fields, spiral beams, spatial light modulator (SLM).

Daria Prokopova, Fourth-Year Student, Engineer.

E-mail: prokopovadv@gmail.com

Evgeniy Vorontsov, Candidate of Physics and Mathematics,

Engineer. E-mail: vorontsov2005@rambler.ru

Nikolay Losevsky, Research Fellow.

E-mail: losevsky@fian.smr.ru

Evgenia Razueva, Associate Research Fellow.

E-mail: evgenia.razueva@yandex.ru