

Голографические транспаранты для формирования оптических вихрей с заданной фазовой топологией

Д. И. Штырёв, Е. А. Мельникова, В. В. Могильный, А. Л. Толстик

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: fiz.shtyrev@bsu.by*

Оптимизированы условия записи голографических транспарантов для формирования фазовых сингулярных световых пучков с заданными топологическими зарядами на основе фотополимерных материалов – голографические пластинки ПФГ-03 М и фоточувствительный антраценсодержащий полимер. Показано, что разработанные транспаранты обладают высокой лучевой стойкостью, дифракционной эффективностью до 20 % и перспективны для использования в лазерно-оптической технике и технологиях.

Ключевые слова: объемные голограммы; фазовая оптическая запись; фотополимеры; сенситизированное фотоокисление; сингулярные световые пучки; топологический заряд; идентификация оптических вихрей.

Holographic transparencies for the formation of optical vortices with a given phase topology

D. I. Shtyrev, E. A. Melnikova, V. V. Mahilny, A. L. Tolstik

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: fiz.shtyrev@bsu.by

The recording conditions for holographic transparencies for the formation of phase singular light beams with specified topological charges have been optimized using photopolymer materials – PFG-03M holographic plates and a photosensitive anthracene-containing polymer. The developed transparencies have been shown to possess high radiation resistance, diffraction efficiency of up to 20 %, and are promising for use in laser-optical engineering and technology.

Keywords: volume holograms; phase optical recording; photopolymers; sensitized photooxidation; singular light beams; topological charge; optical vortex identification.

Введение

В настоящее время большой научный и прикладной интерес имеют пространственно структурированные световые пучки. Такие пучки характеризуются сложной топологией распределения амплитуды, фазы и/или поляризации. Среди многообразия полей с заданной фазово-поляризационной структурой можно выделить оптические вихри – сингулярные световые пучки, которые переносят орбитальный угловой момент фотонов [1]. Эти световые пучки являются особенными за счёт своих необычайных свойств: наличие ядра (винтовой дислокации), в которой амплитуда обращается в нуль, а фаза является неопределенной величиной, а также винтовой структуры волнового фронта в окрестности этой дислокации. Вокруг ядра происходит «завихрение» энергетического потока, которое и позволяет, например, захватывать и манипулировать микрообъектами [2]. Такие пучки нашли применение в системах

оптической связи, для эффективной лазерной обработки материалов, при зондировании атмосферы и т. д. [3, 4].

На сегодняшний день разработано множество способов создания сингулярных световых пучков. Однако многие из них являются достаточно громоздкими, а также их практическое значение ограничено сравнительно высокой стоимостью для их применения в современной фотонике.

В 1990 году ученые М. С. Соскин, М. В. Васнецов, В. Ю. Баженов продемонстрировали, что внесение в топологию штрихов дифракционной решетки оптических дислокаций приводит к формированию дифрагированных пучков с фазовыми сингулярностями [5]. Этот принцип использовался во многих последующих работах и является наиболее распространенным для генерации оптических вихрей [6].

В настоящей работе для формирования оптических вихрей использовались как классические голографические пластинки ПФГ-03 М, так и фоточувствительный антраценсодержащий полимер. Фотоокисление и фотодимеризация молекул антрацена в полимерных стеклах нашли применение при создании фоторегистрирующих материалов объемно-фазового типа с модуляцией показателя преломления на уровне $\sim 10^{-3}$. Процесс образования голографических структур в объеме и на поверхности слоев композиций полимер-низкомолекулярный антрацен является известным и хорошо описанным в настоящее время [7, 8].

1. Экспериментальная установка

Запись голографических элементов проводилась по схеме Лейта-Упатниекса на различных фоточувствительных материалах. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

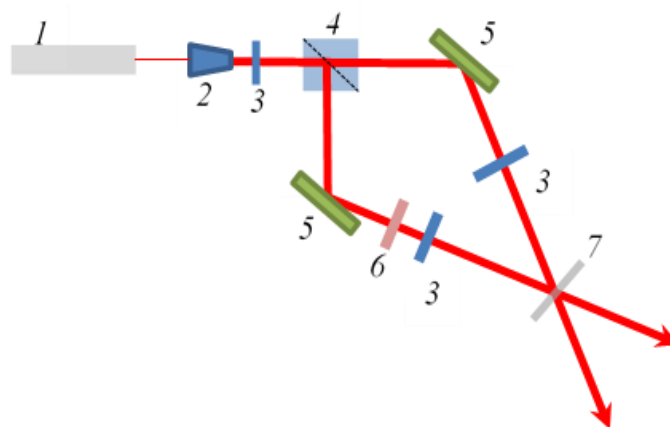


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Излучение He-Ne лазера 1 на длине волны генерации 633 нм проходило систему «микрообъектив-пинхол» 2, полуволновую пластинку 3 и разделялось кубиком 4 на два пучка, которые при помощи зеркал 5 сводились в плоскости фотопластины 7. Помещенная в одно из плеч спиральная фазовая пластинка 6 формировала предметную волну в виде фазового сингулярного пучка с нужным значением

топологического заряда. Полуволновые пластинки 3 обеспечивали вертикальную линейную поляризацию интерферирующих волн.

2. Объемно-пропускающая амплитудная вортекс голограмма

В ходе работы была проведена оптимизация параметров записи объемной пропускающей амплитудной решетки, формирующей в первом порядке дифракции оптический вихрь. Запись голограммы проводилась по схеме Лейта-Упатниекса на голографической пластинке ПФГ-03 М (АО «Компания Славич», Переславль-Залесский, Россия). Угол схождения пучков составлял 30 градусов.

С целью оптимизации голографической записи первоначально была записана голограмма фазового сингулярного пучка с высоким топологическим зарядом $l = -4$. На рис. 2 представлены фотографии распределения интенсивностей в предметной волне (рис. 2, а) и опорной волне (рис. 2, б), зарегистрированные ПЗС-камерой. На рис. 2, в представлена фотография восстановленной предметной волны (первый порядок дифракции). Проведенные эксперименты по оптимизации записи вортекса позволили определить оптимальные параметры экспозиционной дозы, при которых была достигнута максимальная дифракционная эффективность 8 %.

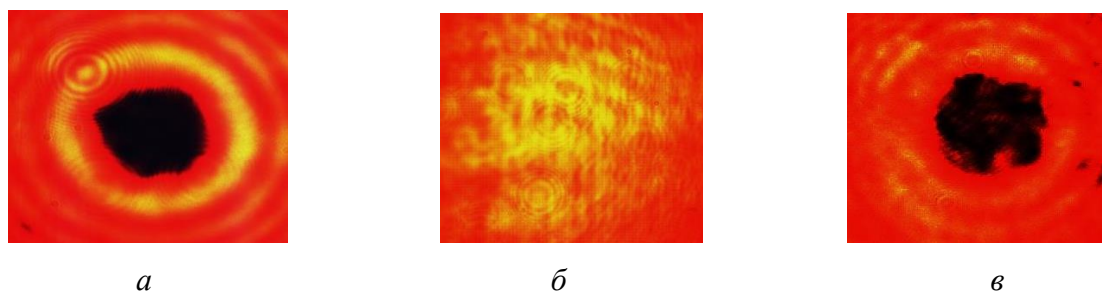


Рис. 2. Пространственные распределения интенсивностей световых пучков:
а – предметный сингулярный пучок с топологическим зарядом «-4»;
б – опорная плоская волна;
в – сингулярная волна, образованная при восстановлении голограммы

Восстановленные оптические вихри анализировались как при помощи интерферометра Маха-Цандера, так и с использованием жидкокристаллической (ЖК) электрически управляемой линзы Френеля [9, 10]. Интерференционный анализ фазовой топологии восстановленного сингулярного пучка, проведенный на основе схемы интерферометра Маха-Цандера, позволил сделать вывод о сохранении топологии фазы оптического вихря при голографической записи и восстановлении.

После оптимизации условий записи вортекс-голограммы были записаны объемные голографические элементы для формирования сингулярных пучков с топологическими зарядами ± 1 , ± 2 , ± 3 . Восстановленные оптические вихри анализировались с помощью ЖК линзы Френеля (рис. 3): при нормальной фокусировке (оптический вихрь проходит вдоль оси ЖК линзы) в Фурье-плоскости ядро сингулярного фазового пучка с зарядом $l = n$ распадается на n изолированных ядер с провалом интенсивности. Внесение астигматизма в пучок посредством поворота линзы приводит к выстраиванию сформированных нулей интенсивности вдоль прямой под

углом ± 45 градусов к плоскости внесенного астигматизма (знак угла наклона определяет знак топологического заряда).

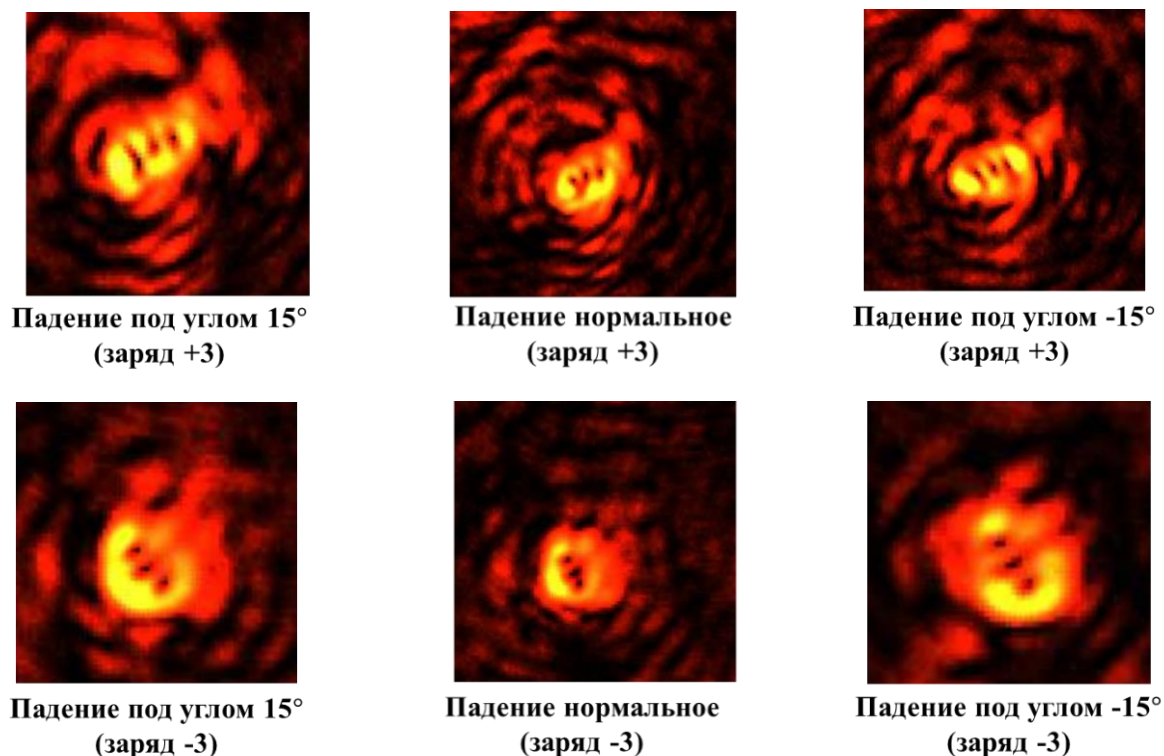


Рис. 3. Анализ восстановленных световых пучков на наличие фазовой дислокации и определения их топологических зарядов при нормальной фокусировке в Фурье-плоскости для топологического заряда ± 3

3. Объемно- фазовая и плоско-фазовая вортекс голограммы

Далее проводилась запись на фоточувствительном полимерном материале с боковыми антраценовыми группами. Фазовый отклик в используемой среде происходит за счет фотоокисления, которое приводит к фоторефракции в объеме. Механизм фотоокисления позволяет сдвинуть границу фоточувствительности в длинноволновую область спектра за счет фотосенсибилизаторов для генерации синглетного кислорода. В данном случае сенсибилизатором выступает краситель метиленовый синий.

Для получение объемного транспаранта использовалась та же геометрия записи (рис. 1). В ходе оптимизации условий записи была найдена оптимальная экспозиция для получения максимальной дифракционной эффективности на уровне 20 %. Для записи плоской голограммы был уменьшен угол схождения световых пучков, позволивший записать решетку с периодом 2,5 мкм. В этом случае была реализована дифракционная эффективностью 4 %.

Для идентификации и анализа фазовых топологий записанных голографических транспарантов также использовалась линза Френеля в геометрии, позволяющей получить интерференцию световых пучков – прошедшего и дифрагированного в первый порядок (рис. 4), при этом количество разветвлений определяет абсолют-

ную величину топологического заряда, а направление закрутки однозначно определяет знак заряда.

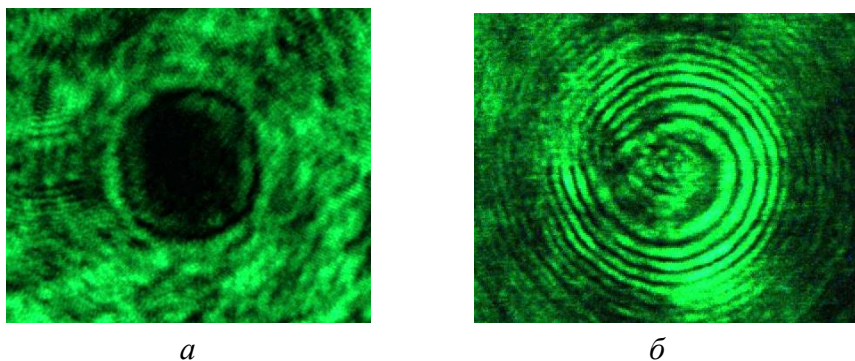


Рис. 4. *а* – восстановленный сингулярный пучок с топологическим зарядом «-4»;
б – результат интерференции прямопрошедшей волны со сходящейся сингулярной волной

Таким образом, в работе продемонстрирована запись голографических транспарантов с топологическими зарядами ± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 на фоточувствительных полимерных средах – голографические пластинки ПФГ-03 М и фоточувствительный антраценсодержащий полимер. На фотопластинках ПФГ-03 М реализована запись вихрево-голограмм с дифракционной эффективностью 8 %. При использовании полимерного материала с боковыми антраценовыми группами достигнута дифракционная эффективность 4 % для плоских голограмм и 20 % при объемной голографической записи.

Библиографические ссылки

1. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen [et al.] // *Light Sci Appl.* 2019. Vol. 8, № 90. P. 1–29.
2. Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures / K. Toyoda [et al.] // *Nano Lett.* 2012. Vol. 12. P. 3645–3649.
3. Terabit freespace data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang [et al.] // *Nat Photon.* 2012. Vol. 6. P. 488–496.
4. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum / M. P. Lavery [et al.] // *Science.* 2013. Vol. 341. P. 537–540.
5. Bazhenov, V. Yu. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts / V. Yu. Bazhenov, M. V. Vasnetsov, M. S. Soskin // *JETP Lett.* 1990. Vol. 52, № 8. P. 429–431.
6. Дифракционные жидкокристаллические элементы для формирования вихревых световых полей / А. А. Казак [и др.] // *Вестник Белорусского гос. ун-та. Сер.1.* 2011. № 1. С. 3–6.
7. Оптическая голография с записью в трехмерных средах / А. П. Попов [и др.] / (под ред. Ю.Н. Денисюка). – Ленинград: Наука, 1986. С. 82–91.
8. Фоточувствительный полимерный материал для объемно- и рельефно-фазовой голографической записи в широкой спектральной области / В. В. Могильный [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии.* 2025. Т. 92, № 2. С. 246–254.
9. Tunable Liquid Crystal Twisted-Planar Fresnel Lens for Vortex Topology Determination / E. Melnikova [et al.] // *Laser Photonics Reviews.* 2024. Vol. 19, № 4. 2401006.
10. Phase Topology Stability of an Optical Vortex via an Electrically Controlled Twist-Planar Oriented Liquid Crystal Fresnel Lens / E. Melnikova [et al.] *arXiv:2506.02632 [physics].* – arXiv, 2025.