

37. Вспомогательные вещества, используемые в технологии мягких лекарственных форм (мазей, гелей, линиментов, кремов) (обзор) / О.А. Семкина [и др.] // Хим.-фармац. журн. – 2005. – Т. 39, № 9. – С. 45-48

УДК 338.24:658.521

**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ЦЕННЫХ  
БУМАГ И ДОКУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО  
КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ  
HOLOGRAPHIC TECHNOLOGIES FOR PROTECTION OF  
SECURITIES AND DOCUMENTS BASED ON PHASE  
INFORMATION CODING**

**Леонид Викторович Танин<sup>1,2</sup>, Алексей Леонидович Толстик<sup>2,3</sup>,  
Елена Александровна Мельникова<sup>3</sup>  
Leonid V. Tanin<sup>1,2</sup>, Alexei L. Tolstik<sup>2,3</sup>, Elena A. Melnikova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ЗАО «Голографическая индустрия», Республика Беларусь, г. Минск

<sup>1</sup>CJSC "Holography industry", Republic of Belarus, Minsk

<sup>2</sup>Международная инженерная академия, Республика Беларусь, г. Минск

<sup>2</sup>International Academy of Engineering, Republic of Belarus, Minsk

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, г. Минск

<sup>3</sup>Belarusian State University, Republic of Belarus, Minsk

(e-mail: tolstik@bsu.by)

**Аннотация:** Предложены методики использования знака и величины топологического заряда сингулярного светового пучка в качестве информационных параметров для кодирования цифровой информации. Продемонстрирована устойчивость оптических вихрей высокого порядка на расстояниях, существенно превышающих длину дифракционного расплывания, что позволяет перейти от двоичного кодирования информации к системам с большим числом цифровых знаков.

**Abstract:** The methods of using sign and magnitude of the topological charge of a singular light beam as information parameters for coding of digital information have been proposed. It has been demonstrated that high-order optical vortices were stable at distances considerably exceeding the diffraction blurring to enable a transfer from binary information coding to systems with a great number of digital characters.

**Ключевые слова:** голографические защитные технологии, сингулярная оптика, оптические вихри, топологический заряд.

**Keywords:** holographic protection technologies, singular optics, optical vortices, topological charge.

Голографические элементы защиты ценных бумаг и документов широко используются во многих странах мира. Эти технологии обеспечивают сочетание первичного визуального контроля подлинности голографического элемента с приборным контролем скрытых либо закодированных изображений. В качестве таких элементов могут быть использованы микротексты, кодирование в виде штрих-кода, различные типы 2D и 3D изображений на основе дифракционных оптических элементов. Актуальность тематики обеспечила разработку и широкое использование различных передовых технологий,

включая такие, как Floatinglogo, Litho, TrueColor и др., позволяющие записывать скрытые изображения, которые видны при направленном источнике освещения, а также реализовывать разнообразные кинематические эффекты. В то же время, быстрый рост научно-технического прогресса, развитие лазерной и голографической техники обусловили реальную возможность копирования и изготовления подделок голограмм не только в кустарном, но и промышленном масштабе. Все это определило необходимость дальнейшего развития и внедрения новых технологий записи и кодирования информации с целью повышения степени защищенности от подделки самих голографических элементов защиты.

В последнее время повышенный интерес в современной фотонике вызывают, так называемые, сингулярные световые пучки, обладающие орбитальным угловым моментом. Такие пучки позволяют формировать пространственные структуры световых полей с заданными фазово-поляризационными характеристиками, используемые в системах оптической обработки информации и передачи информационных сигналов, оптического захвата и манипулирования микро- и биообъектами, лазерной обработки материалов, зондирования атмосферы [1-5]. Сингулярные световые пучки были предложены нами также для использования в системах защиты от подделки ценных бумаг и документов [6, 7].

В настоящей работе развиты методы формирования сингулярных световых пучков и контроля их фазовых характеристик, предложены варианты использования знака и величины топологического заряда сингулярного пучка в качестве информационных параметров для кодирования цифровой информации, включая возможность перехода от двоичной системы кодирования к системам с большим числом цифровых знаков.

Особенностью сингулярных световых пучков, которые часто называют оптическими вихрями, является наличие на волновом фронте светового пучка особой точки – винтовой дислокации. В данной точке фаза электромагнитных волн не определена, а амплитуда обращается в ноль. Поверхность волнового фронта становится непрерывной поверхностью со специфической винтовой структурой типа винта Архимеда, в то время как для обычных плоских волн поверхность волнового фронта представляет набор плоскостей, равноотстоящих на расстояниях, кратным длине волны. Основным свойством винтовой дислокации является то, что при обходе вокруг нее по поверхности волнового фронта, фаза изменяется на величину  $2\pi l$ , где  $l$  – величина топологического заряда. В окрестности винтовой дислокации происходит «завихрение» энергетического потока, т.е. такой световой пучок обладает орбитальным моментом и может вращать микрообъекты. В зависимости от знака топологического заряда  $l$  винтовые дислокации разделяются на положительные (правые) и отрицательные (левые).

Комплексную амплитуду сингулярного светового пучка, распространяющегося вдоль оси  $Z$ , можно записать в следующей форме:

$$E(r, \theta) = A_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{|l|} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2} + il\theta\right), \quad (1)$$

где  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $x, y$  – координаты точки в поперечном сечении сингулярного пучка радиуса  $r_0$  (центр системы координат находится в центре пучка),  $\theta = \arctg(y/x)$  – азимутальный угол,  $l$  – топологический заряд.

Из формулы (1) следует классический вид сингулярного пучка с поперечным распределением интенсивности в виде кольца, причем диаметр кольца увеличивается с увеличением величины топологического заряда. Типичный вид распределения интенсивности и фазы сингулярных пучков с различными топологическими зарядами представлены на рисунке 1 (левый столбец).

Для идентификации топологического заряда, как правило, используют интерференционные методы, основанные на интерференции сингулярного пучка с когерентными плоской или сферической волнами. Рассчитанные картины интерференции представлены также на рисунке 1. Центральный столбец соответствует случаю

интерференции фазового сингулярного пучка с плоской волной, правый столбец – со сферической волной. В первом случае топологический заряд определяется количеством увеличения числа интерференционных полос до и после точки бифуркации, во втором случае – количеством спиралей, при этом знак топологического заряда определяется направлением закрутки спиралей (по часовой стрелке – положительный, против часовой стрелки – отрицательный топологический заряд).

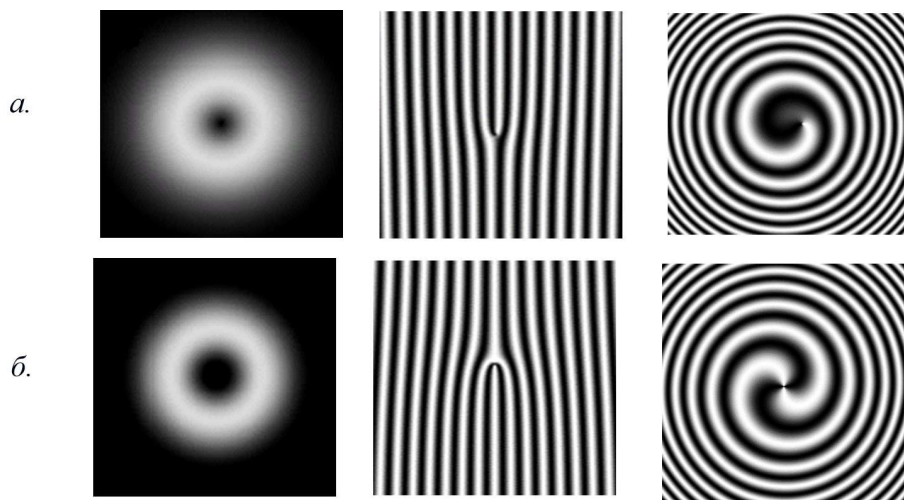
Расчеты проводились по следующим формулам:

$$I(x, y) \sim A_1^2 + A_2^2 \left( \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right)^{|l|} + 2A_1 A_2 \left( \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right)^{\frac{|l|}{2}} \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} - l \cdot \arctg \left( \frac{y}{x} \right) \right], \quad (2)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$  – амплитуды плоской волны и вихревого пучка соответственно,  $\Lambda$  – период интерференционной картины, определяемый углом схождения световых пучков, и

$$I(x, y) \sim A_s^2 + A_2^2 \left( \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right)^{|l|} + 2A_s A_2 \left( \frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right)^{\frac{|l|}{2}} \cos \left[ \frac{2\pi x}{\Lambda} - l \cdot \arctg \left( \frac{y}{x} \right) + \frac{2\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right], \quad (3)$$

где  $R$  – радиус кривизны волнового фронта сферической волны.

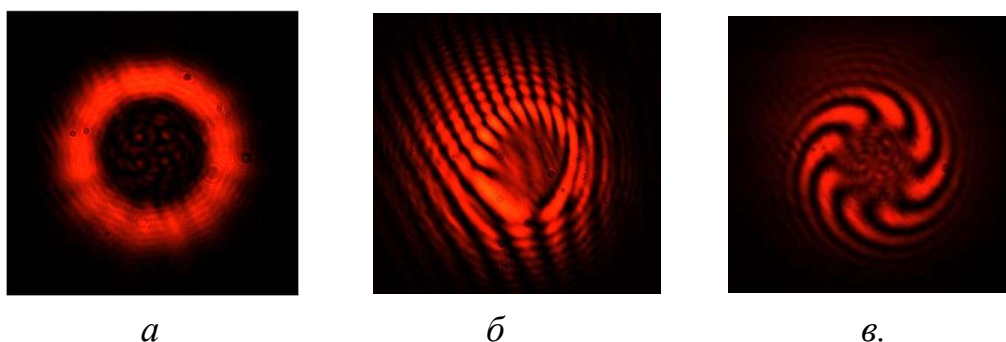


**Рисунок 1 – Примеры амплитудной структуры сингулярных пучков с топологическими зарядами  $l=+1(a)$ ,  $l=-2(b)$  и соответствующие картины интерференции сингулярных пучков с плоской и сферической волнами**

На основе рассчитанных картин интерференции были созданы голографические транспаранты, которые формировали сингулярные пучки при восстановлении голограммы плоской или сферической волнами. Следует отметить, что при записи тонких голограмм появляется уникальная возможность мультиплицирования величины топологического заряда, используя дифракцию во второй и более высокие порядки. Топологический заряд определяется в виде произведения заряда исходного сингулярного пучка, используемого для записи оптического транспаранта, на номер порядка дифракции.

Несмотря на то, что сингулярные пучки с высокими топологическими зарядами являются неустойчивыми, проведенные в работе исследования показали существенную зависимость длины, на которой сохраняется структура сингулярного пучка от качества изготовления оптического транспаранта. Дифракционная расходимость изменяет поперечный размер светового пучка, сохраняя нулевую интенсивность в центре пучка. Проведенные эксперименты с изготовленными голографическими транспарантами показали устойчивость вихрей высокого порядка на расстояниях, превышающих несколько метров, что достаточно для использования таких пучков в системах кодирования информации применительно к голографическим элементам защиты от подделки ценных бумаг и документов. В качестве примера на рисунке 2 представлены пространственное распределение интенсивности и интерференционные картины, полученные для сингулярного светового пучка с топологическим зарядом  $l = 8$  [8].

Апробация предложенного метода использования топологического заряда сингулярного светового пучка в качестве информационного параметра для цифрового кодирования в системах голографической защиты от подделки ценных бумаг и документов показала перспективность использования систем кодирования с большим числом цифровых знаков, например, это может быть восьмеричная система из восьми цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, привычная нам десятичная система: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 или шестнадцатеричная система – из десяти цифр и шести латинских букв: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F. Наряду со значением топологического заряда в качестве информационных параметров перспективно использование знака топологического заряда сингулярного пучка.



**Рисунок 2 – Распределение интенсивности сингулярного пучка с топологическим зарядом  $l=8$  (а) и измеренные картины интерференции сингулярного пучка с плоской (б) и сферической (в) волнами**

**Выводы:** Таким образом, использование величины и знака топологического заряда сингулярного светового пучка в качестве информационных параметров позволяет проводить кодирование информации с переходом от двоичной системы кодирования к системам с большим числом цифровых знаков. Появляется возможность привнести дополнительную информационную компоненту в голографические защитные элементы и повысить степень защиты от подделки ценных бумаг и документов.

#### Список литературы

1. Gibson G., Courtial J., Padgett M.J., Vasnetsov M., Pas'ko V., Barnett S.M., Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // Optics Express. 2004. V. 12. P. 5448-5456.
2. Djordjevic I.B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation // Optics Express. 2011. V. 19. P. 14277-14289.
3. Padgett M.J., Bowman R. Tweezers with a twist // Nature Photonics. 2011. V. 5. P. 343-348.
4. Толстик А.Л. Сингулярная динамическая голография // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. С. 65-73.
5. Cheng W., Liu X.-L., Polynkin P. Simultaneously spatially and temporally focused femtosecond vortex beams for laser micromachining // Journal of the Optical Society of America B. 2018. V. 35. P. B16-B19.
6. Толстик А.Л., Сухоруков А.П. Сингулярная оптика и динамическая голография // Весці НАН Беларусі. 2014. № 2. с. 29-40.
7. Танин Л.В., Горчарук А.И., Мельникова Е.А., Толстик А.Л. Использование винтовой фазовой дислокации волнового фронта для записи нового вида скрытого изображения // Сборник статей XIV Международного научного форума «Перспективные задачи инженерной науки» (17 мая 2023 г., г. Москва), Международная инженерная академия. М.: ООО «Инженерный центр «Импульс», РГУ им. А.Н. Косыгина. 2023, с. 39-44.