

# Экспериментальное исследование голографического формирования фотонных структур Бесселеподобными световыми пучками в фотополимерных материалах

В.О. Долгирев<sup>1</sup>, Д.И. Дудник<sup>1</sup>, А.О. Семкин<sup>1</sup>, С.Н. Шарангович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Ленина 40, Томск, Россия, 634050

**Аннотация.** В данной работе приведены результаты экспериментов по голографическому формированию дифракционных оптических элементов для преобразования Гауссовых световых пучков в бесселеподобные (одномерные и двумерные) в фотополимерных материалах при помощи амплитудных транспарантов.

## 1. Введение

Бесселеподобные пучки лазерного излучения имеют огромное количество возможных прикладных применений в медицине, биомедицинской оптике, фармакологии и других. Одно из них – это применение в устройствах манипулирования наноразмерными объектами [1]. Актуальным является поиск дешевых и технологичных методов формирования таких пучков. Как известно, одним из наиболее эффективных методов формирования дифракционных элементов является голографический с использованием фоточувствительных сред [1-3 и др.]. Эффективность метода обуславливается тем, что распределение показателя преломления или коэффициента поглощения фоточувствительной среды целиком определяется схемой голографической записи, а также физико-химическими процессами, протекающими в среде. Таким образом, путем изменения условий голографического формирования можно создавать сколь угодно сложные дифракционные (фотонные) структуры.

В работах [4-6] была показана возможность формирования дифракционных структур бесселеподобными пучками в кристаллах ниобата лития проекционным методом. Кроме этого, в работах [7-9] развиты теоретические модели голографического формирования и считывания дифракционных элементов для преобразования световых полей в бесселеподобные.

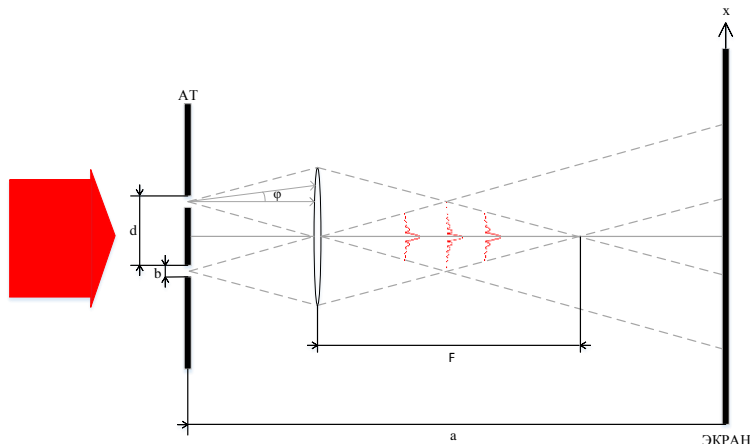
Данная работа продолжает цикл исследований процессов голографического формирования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в фотополимеризующихся композициях, содержит результаты экспериментов и ставит своей целью изучить возможность создания голографических ДОЭ с помощью специально созданных амплитудных транспарантов.

## 2. Экспериментальные установки

В данной работе рассматриваются бесселеподобные пучки первого рода нулевого порядка. Математическая функция Бесселя первого рода имеет вид [5-6]:

$$J(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+n} \tag{1}$$

где  $n$  – произвольное вещественное число, называемое порядком,  $x$  – координата.  
 Для преобразования падающего светового поля в бесселеподобный пучок используется установка, изображенная на рисунке 1. Установка состоит из амплитудного транспаранта, на которую нормально падает плоская монохроматическая волна [4-6], линзы и экрана.



**Рисунок 1.** Схема установки формирования бесселеподобного светового пучка [4-6].

Интенсивность света за амплитудным транспарантом зависит от угла  $\varphi$  между направлением распространения света и нормалью к экрану [4-6]:

$$I = 2 \cdot I_0 \left( \frac{\sin(k \cdot b \cdot \varphi \cdot \lambda / 2)}{k \cdot b \cdot \varphi \cdot \lambda / 2} \right)^2 \cdot (1 + \cos(k \cdot \Delta + k \cdot d \cdot \varphi)), \tag{2}$$

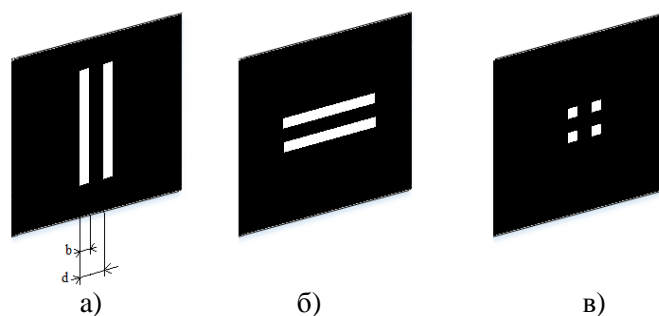
где  $I_0$  – интенсивность света в центре дифракционной картины, когда открыта только одна щель,  $b$  – ширина щели,  $d$  – расстояние между центрами щелей,  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны света,  $\Delta$  – дополнительная разность хода между интерферирующими лучами (в случае наклонного падения плоской волны на экран).

Выше описанное выражение имеет зависимость от угла между направлением распространения света и нормалью. Для того чтобы преобразовать угол в координату для дальнейшего сравнения с результатами измерений воспользуемся тригонометрическим выражением для тангенса угла  $\varphi$  и тогда выражение примет следующий вид:

$$I(x) = 2 \cdot I_0 \left( \frac{\sin(k \cdot b \cdot \arctan(x/a) / 2)}{k \cdot b \cdot \varphi / 2} \right)^2 \cdot (1 + \cos(k \cdot \Delta + k \cdot d \cdot \arctan(x/a))), \tag{3}$$

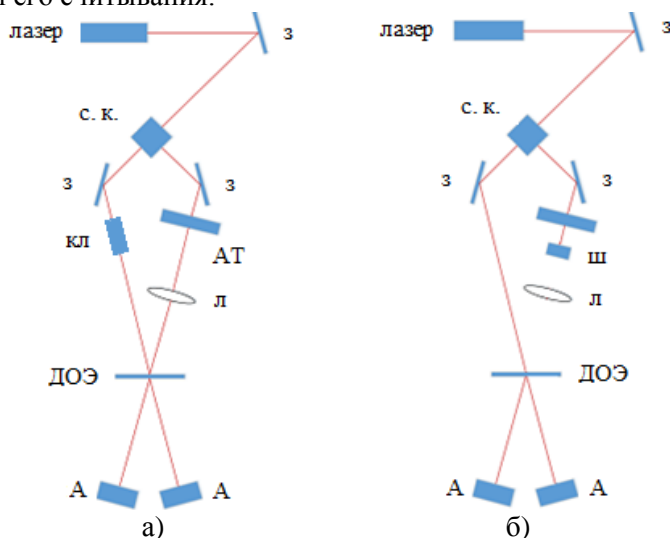
где  $a$  – расстояние от амплитудного транспаранта до центра экрана.  
 Первый множитель в квадратных скобках описывает дифракцию Фраунгофера на одной щели, а второй множитель – интерференцию от двух точечных источников. Общая энергия, проходящая через одну щель, пропорциональна  $b$ , а ширина дифракционной картины пропорциональна  $1/b$ . Поэтому, интенсивность света  $I_0$  в центре дифракционной картины будет пропорциональна  $b^2$ . Если мы рассмотрим дифракцию на двух щелях, то в пределах первого дифракционного максимума мы можем наблюдать  $N$  интерференционных полос, где  $N=2d/b$ . При использовании двух щелей возможно преобразовать гауссов световой пучок в одномерный бесселеподобный.

Формирование двумерного бесселеподобного пучка происходит путем перпендикулярного наложения двух амплитудных транспарантов с параллельными щелями. Созданы амплитудные транспаранты с двумя параллельными щелями на непрозрачном экране, изображенные на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Амплитудные транспаранты с параллельными щелями (а) вертикальными, (б) горизонтальными, (в) вертикальными и горизонтальными [4–6].

На рисунке 3 приведены схемы экспериментальных установок для голографического формирования ДОЭ и его считывания.



**Рисунок 3.** Схема установки (а) для формирования ДОЭ и (б) схема установки для считывания ДОЭ.

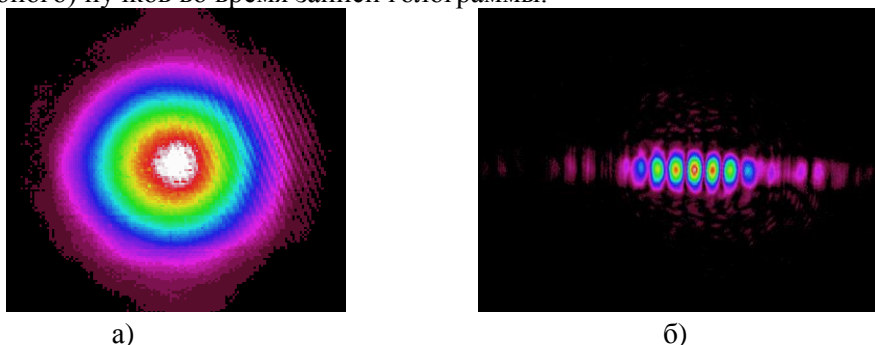
На рисунке 3 (а) лазер с длиной волны излучения 633 нм формирует опорный гауссов световой пучок с круговой поляризацией диаметром 2 мм и мощностью 2 мВт. После отражения от зеркала (з) пучок разделяется на два с помощью светоделительного кубика (с. к.). Далее сигнальный пучок посредством амплитудного транспаранта (АТ) приобретает бесселеподобное распределение интенсивности. АТ состоял из одной или двух металлических пластин, имеющих по 2 щели каждая, наложенных друг на друга. Пластины имели ширину щелей 200 мкм и расстояние между щелями 900 и 700 мкм. Для двумерного случая, посредством наложения двух пластин друга на друга, формируется двумерный бесселеподобный пучок. Расстояние от АТ до линзы (л) и от линзы до ДОЭ соответствовало фокусному расстоянию самой линзы (18.4 см). Угол падения опорного и сигнального пучка составлял 4 град. Опорный пучок после зеркала (з) уширялся при помощи коллиматора (кл) до величины апертуры в 4 мм. Материал ДОЭ представляет собой многокомпонентную смесь органических веществ, нанесенную в виде аморфной пленки толщиной 10-100 мкм на стеклянную, пластиковую или пленочную подложку [10]. Регистрирующий слой содержит полимерный носитель, фотополимеризующиеся мономеры, систему фотоинициирования, пластификаторы, поверхностно-активные вещества и ряд других ингредиентов. Наличие в нем красителя-сенситизатора обеспечивает чувствительность материала в области излучения записывающего лазера [10].

В объеме образца ФПМ опорный и сигнальный пучок интерферируют. Далее, следуя голографическому принципу, в нем формируется фазовая пропускающая голограмма.

Анализатор лазерных пучков (А) фиксирует распределение интенсивности проходящих сигнального и опорного пучков.

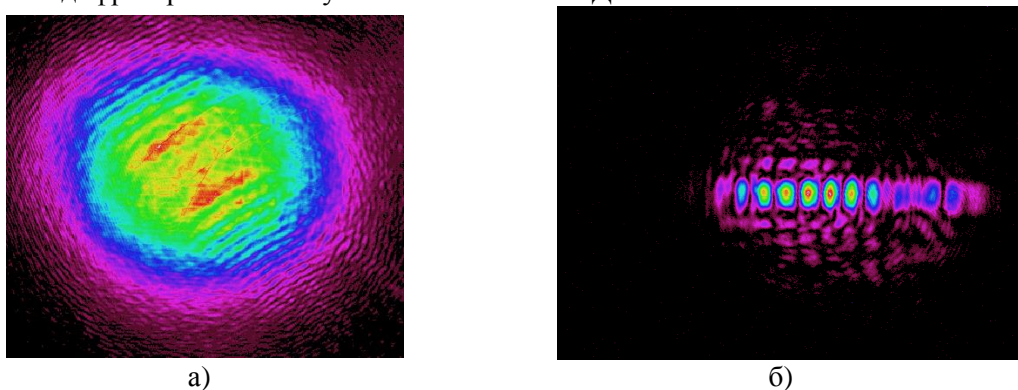
### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Для получения одномерного бесселеподобного пучка использовался АТ, который состояли из металлической пластины с двумя щелями, расположение щелей соответствует рисунку 2 (а). Ширина щели 200 мкм и с расстоянием между щелями 900 мкм. На рисунке 4 приведены изображения интенсивности опорного (Гауссова) и сигнального (одномерного бесселеподобного) пучков во время записи голограммы.



**Рисунок 4.** Распределения интенсивности (а) опорного и (б) сигнального пучков при записи голограммы.

Далее для считывания сформированного голографического ДОЭ сигнальный пучок перекрывается шторкой (ш) и с помощью анализатора пучков фиксируется распределение интенсивности дифрагировавших волн. На рисунке 5 приведены распределения интенсивности опорного и дифрагировавшего пучков на записанном ДОЭ.



**Рисунок 5.** Распределения интенсивности (а) опорного и (б) дифрагировавшего пучков.

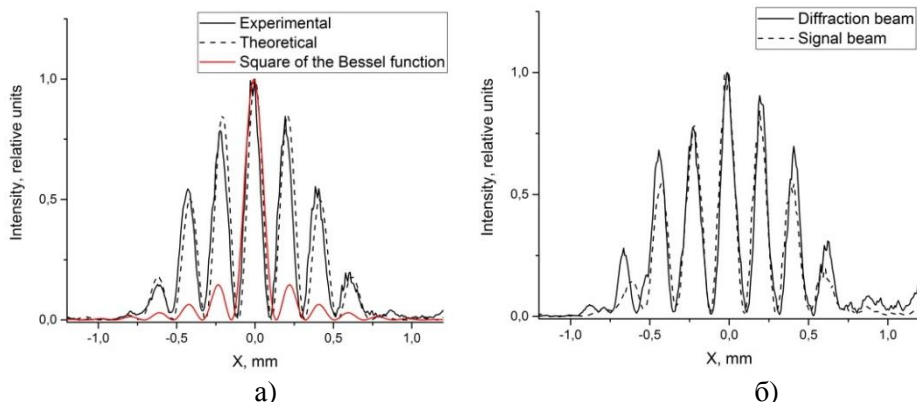
Из рисунка 5 (б) видно, что дифрагировавший пучок имеет близкое к сигнальному пучку (рисунок 4 (б)) распределение интенсивности.

На рисунке 6 приведены нормированные профили сигнального и дифрагировавшего пучков вдоль координаты «х» относительно их максимальной амплитуды. Теоретические кривые получены с использованием выражения (1-2).

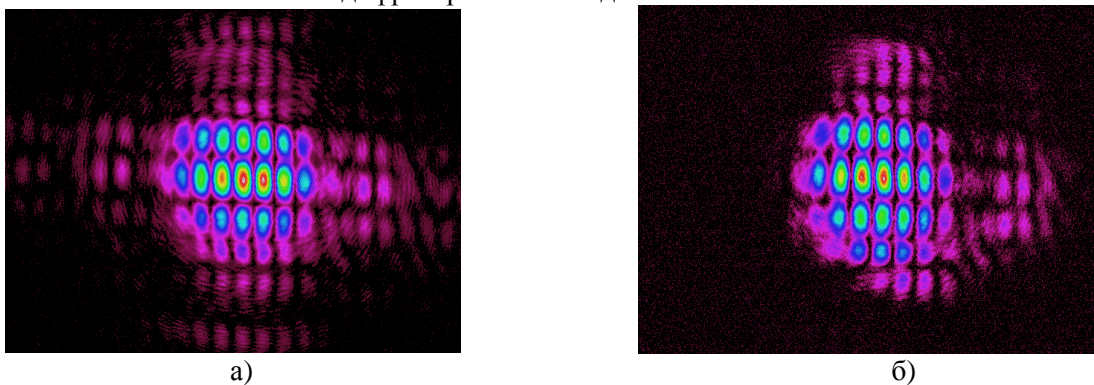
Из рисунка 6 видно, что распределение интенсивности вдоль координаты «х» имеет бесселеподобное. Отличием от квадрата функции Бесселя является амплитуда боковых максимумов, которая имеет большее значение. Это объясняется геометрическими параметрами амплитудного транспаранта, от которых зависит вид получаемого бесселеподобного пучка.

Аналогичным образом проводился опыт и для получения двумерных бесселеподобных пучков. Для этого в качестве АТ выступали две металлические пластины с двумя щелями, наложенные друг на друга (рисунок 2). Ширина щели 200 мкм, с расстоянием между щелями 700 и 900 мкм.

На рисунке 7 представлены распределения интенсивности сигнального (двумерный бesselеподобный пучок) и дифрагировавшего пучков.



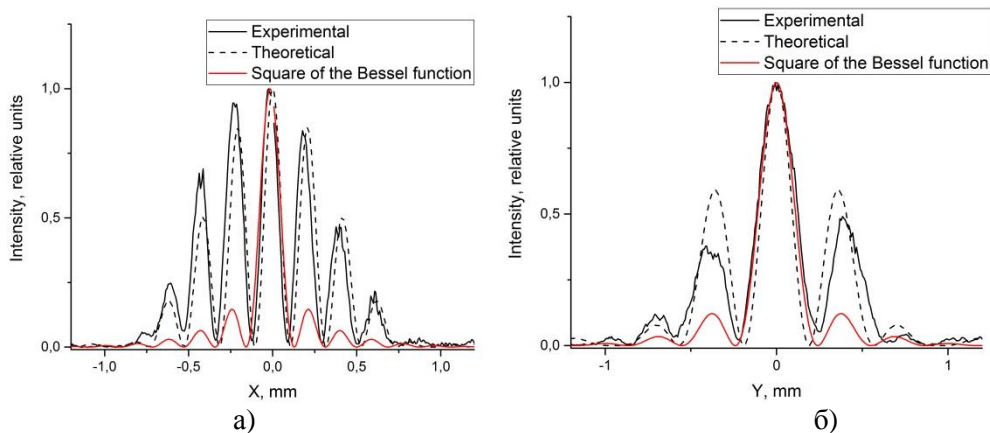
**Рисунок 6.** Нормированные профили (а) сигнального пучка во время записи и (б) дифрагировавшего вдоль оси «х».



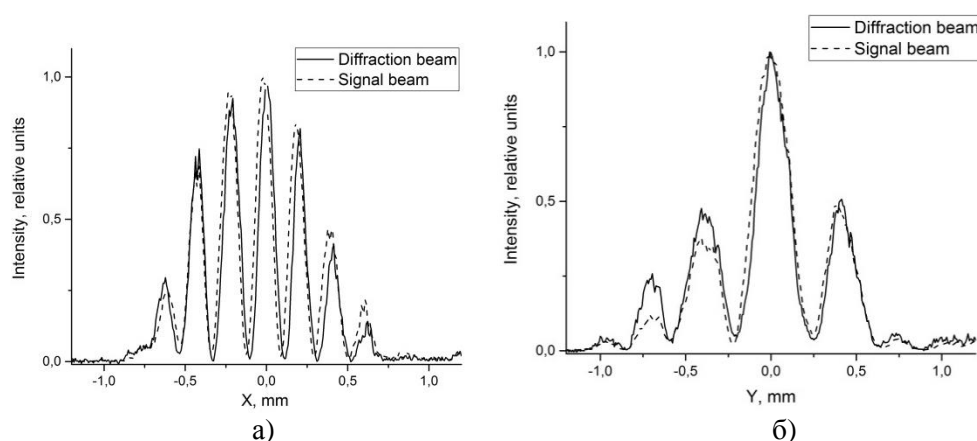
**Рисунок 7.** Распределения интенсивности (а) сигнального пучка при записи и (б) дифрагировавшего пучка при считывании ДОО.

Из рисунка 7 видно, что дифрагировавший пучок имеет близкое к сигнальному распределение интенсивности двумерного бesselеподобного пучка.

На рисунках 8 и 9 приведены нормированные профили сигнального и дифрагировавшего пучка вдоль координат «х» и «у» относительно их максимальной амплитуды. Теоретические кривые получены с использованием выражений (1-2).



**Рисунок 8.** Профили сигнального пучка во время записи (а) вдоль оси «х» и (б) вдоль оси «у».



**Рисунок 9.** Профили дифрагировавшего и сигнального пучков (а) вдоль оси «х» и (б) вдоль оси «у».

Из рисунка 8 и 9 видно центральный и боковые максимумы. На рисунке 8 и 9 профили схожи с распределением функции Бесселя. Ширина и количество максимумов для оси «х» и «у» получились разными, так как использовались пластины с различными параметрами. Как и в предыдущем опыте, разность амплитуд боковых максимумов объясняется геометрическими параметрами АТ.

Важным параметром ДОЭ является дифракционная эффективность (ДЭ). Данный параметр характеризует отношение мощности дифрагированного голограммой пучка к мощности падающего пучка. Выражение для ДЭ представлено ниже:

$$\eta = \frac{I_d}{I_d + I_n} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $I_d$  – интенсивность дифрагированного пучка,  $I_n$  – интенсивность прошедшего пучка. Относительная мощность прошедшего пучка при дифракции для двумерного и одномерного случая составили 257 и 265 единицы. Относительная мощность для дифрагированного пучка для двумерного и одномерного случая составили 1.27 и 1.7. ДЭ в таком случае будет равна:

$$\eta_{\text{двум}} = 0.492\%, \quad \eta_{\text{одно}} = 0.637\%.$$

#### 4. Заключение

В результате работы сформирован ДОЭ с помощью амплитудных транспарантов, позволяющий преобразовывать гауссовы световые поля в одномерные и двумерные бesselеподобные. ДЭ достигалась до 0.637%.

#### 5. Литература

- [1] Казак, А.А. Дифракционные ЖК элементы для формирования вихревых световых полей / А.А. Казак, Л.А. Казак, А.Л. Толстик, Е.А. Мельникова // Вестник БГУ. Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 1. – С. 3-6.
- [2] Groshenko, N.A. Optical vortices in the scattering field of magnetic domain holograms / N.A. Groshenko, O.S. Makalish, A.V. Volyar // Technical physics. The Russian journal of applied physics. – 1998. Vol. 43(12). – P. 1450-1453. DOI: 10.1134/1.1259223.
- [3] Carpentier, A.V. Making optical vortices with computer-generated holograms // American Journal of Physics. – 2008. – Vol. 76(10). – P. 916-921. DOI: 10.1119/1.2955792.
- [4] Inyushov, A. Formation of photonic structures in a bulk of lithium niobate by bessel-like optical beams / A. Inyushov, P. Safronova, I. Trushnikov, V. Shandarov // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 6-17. – С. 224-225.
- [5] Трушников, И.А. Формирование фотонных структур в кристалле ниобата лития Бesselеподобными световыми пучками / И.А. Трушников, П.К. Сафронова, А.В. Инюшов,

- А. Саркыт, В.М. Шандаров // Электронные средства и системы управления. – 2016. – №. 1-1. – С. 126-128.
- [6] Inyushov, A. Formation of Photonic Structures in Photorefractive Lithium Niobate by 1D and 2D Bessel-like Optical Fields / A. Inyushov, P. Safronova, I. Trushnikov, A. Sarkyt, V. Shandarov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 867(1). – P. 012023.
- [7] Семкин, А.О. Голографическое формирование дифракционных элементов для преобразования световых пучков в фотополимерно-жидкокристаллических композициях / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 109-115.
- [8] Semkin, A.O. Holographic formation of phase diffractive elements for light beams conversion with photo-induced absorption coefficient changing in PDLCs / A.O. Semkin, S.N. Sharangovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012072.
- [9] Семкин, А.О. Преобразование гауссовых световых пучков в бесселеподобные голографическими дифракционными элементами в ФПМ-ЖК, управляемыми внешним электрическим полем / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович, В.О. Долгирев, Д.И. Сон // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. – 2018. – С. 518-519.
- [10] Смирнова, Т.Н. Голографические наноконпозиты для записи периодических структур полимер-наночастицы I. Общий подход к выбору компонент наноконпозитов и их голографические свойства / Т.Н. Смирнова, Л.М. Кохтич, О.В. Сахно, И. Штумпе // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 110, №. 1. – С. 135-142.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Госзадания (Проект № 3.1110.2017/4.6).

## Experimental investigation of the holographic formation of photon structures by Bessel-like light beams in photopolymer materials

V.O. Dolgirev<sup>1</sup>, D.I. Dudnik<sup>1</sup>, A.O. Semkin<sup>1</sup>, S.N. Sharangovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Lenina 40, Tomsk, Russia, 634050

**Abstract.** This article presents the results of experiments on the holographic formation of diffractive optical elements for converting Gaussian light beams into Bessel-like in photopolymer materials using amplitude transparencies.