

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 535.3

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-1-72-88>

Поступила в редакцию 19.10.2023

Received 19.10.2023

**А. А. Рыжевич<sup>1,2</sup>, И. В. Балыкин<sup>1</sup>, Т. А. Железнякова<sup>2</sup>, Н. С. Казак<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*<sup>3</sup>*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь***ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТНЫХ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РЕФРАКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Аннотация.** Представлены методы формирования и свойства управляемо изменяющихся во времени и пространстве световых полей, полученных в результате интерференции трех либо четырех когерентных световых пучков с помощью рефрактивных оптических элементов. Формирование 3- и 4-лучевого интерференционных полей осуществляется с использованием соответственно 3- и 4-гранной стеклянных пирамид. Возможность смещения интерференционного поля в поперечной плоскости обеспечивается наличием устройств для управляемого изменения фаз по меньшей мере двух из интерферирующих пучков, направления распространения которых не лежат в одной плоскости с оптической осью исходного пучка, падающего на пирамиду. В 3- и 4-лучевых динамических интерференционных полях пиковые значения интенсивности выше, чем в исходных лазерных пучках и 2-лучевых интерференционных полях, поэтому их целесообразно применять для обработки лазерным излучением плоских объектов, перемещая интерференционные максимумы по поверхности объекта. При попарном азимутальном смещении направлений распространения четырех интерферирующих пучков вокруг продольной оси формируется динамическое интерференционное поле, периодически структурированные максимумы которого циклически плавно изменяют свою форму с ячеек на полосы и обратно, причем при различных скоростях пар направлений интерференционная структура максимумов вращается вокруг продольной оси. Благодаря этому данное поле может применяться для терапевтического воздействия на биологические ткани и для перемешивания микрочастиц в суспензиях и эмульсиях. Поскольку локальные максимумы интенсивности всех указанных интерференционных полей имеют размеры порядка нескольких микрометров, превышая при этом по значению максимум интенсивности исходного светового пучка, данные поля в поперечном сечении являются градиентными и могут применяться не только для лазерного воздействия, но и для перемещения ансамблей микрочастиц, в том числе для сортировки и изменения концентрации.

**Ключевые слова:** световое поле, интерференция, распределение интенсивности, градиент интенсивности, динамическое интерференционное световое поле

**Для цитирования.** Формирование многолучевых динамических градиентных интерференционных световых полей с использованием рефрактивных оптических элементов / А. А. Рыжевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 72–88. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-1-72-88>

**Anatol A. Ryzhevich<sup>1,2</sup>, Igor V. Balykin<sup>1</sup>, Tatyana A. Zheleznyakova<sup>2</sup>, Nikolai S. Kazak<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*<sup>3</sup>*SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Republic of Belarus***FORMATION OF MULTIBEAM DYNAMIC GRADIENT INTERFERENCE LIGHT FIELDS  
WITH REFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS**

**Annotation.** This paper presents methods for the formation and properties of light fields that controllably vary in time and space, obtained as a result of the interference of three or four coherent light beams using refractive optical elements. The formation of three-beam and four-beam interference fields is carried out using trihedral and tetrahedral glass pyramids respectively. The possibility of the interference field displacement in the transverse plane is ensured by devices for controlled phase changes of at least two of the interfering beams. The directions of propagation of these beams do not lie in the same plane with the optical axis of the original beam incident on the pyramid. In three- and four-beam dynamic interference fields the peak intensity values are higher than in the original laser beams and two-beam interference fields, so it is advisable to use them for processing flat objects with laser radiation, moving the interference maxima along the surface of the object. With a pairwise azimuthal displacement of the propagation directions of four interfering beams around the longitudinal axis, a dynamic interference field is formed, the periodically structured maxima of which cyclically smoothly change their shape

from cells to band and back. At different speeds of pairs of directions the interference structure of the maxima rotates around the longitudinal axis. Therefore, this field can be used for therapeutic effects on biological tissues and for mixing microparticles in suspensions and emulsions. Since the local maxima of the intensity of all these interference fields have dimensions of the order of several micrometers while exceeding in value the maximum intensity of the initial light beam, these fields in the cross section are gradient and therefore can be used not only for laser exposure, but also for moving ensembles of microparticles including for sorting and changing concentration.

**Keywords:** light beam, interference, intensity distribution, intensity gradient, dynamical interference light field

**For citation.** Ryzhevich A. A., Balykin I. V., Zheleznyakova T. A., Kazak N. S. Formation of multibeam dynamic gradient interference light fields with refractive optical elements. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-matematichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 1, pp. 72–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-1-72-88>

**Введение.** Начиная с 1970 г. [1] лазерные световые пучки используются для воздействия градиентными силами светового поля на частицы различных размеров: от десятков микрометров до долей нанометра. В первых работах большой градиент световой интенсивности обеспечивался узкой фокусировкой гауссова лазерного пучка [2]. В [3–5] в качестве градиентного светового поля применялся бесселев световой пучок, имеющий интерференционную природу. В [6] впервые были выделены как отдельный класс многолучевые световые поля интерференционного типа. Данные пучки формируются при интерференции  $N$  когерентных световых пучков с интенсивностью  $I_0/N$ , распространяющихся под одним углом  $\gamma$  к общей оси так, что направления их распространения образуют осесимметричную картину  $N$ -го порядка. В [6] было впервые показано, что периодичными в поперечной плоскости являются поля, сформированные при интерференции 2, 3, 4, и 6 когерентных световых пучков. Как периодичные, так и непериодичные многолучевые интерференционные поля в поперечном сечении содержат большое количество локальных максимумов интенсивности малых размеров, в связи с чем могут обеспечивать воздействие на объекты не только за счет высокой интенсивности, но и градиентных сил. В [7] показана возможность формирования 3D периодичных структур из локальных оптических вихрей, которые могут производить одинаковое воздействие на массивы объектов в некоем объеме. В научной практике существует понятие светоиндуцированных решеток как периодических структур, наводимых в среде распространяющимся в ней мощным импульсным лазерным излучением, распределение интенсивности которого имеет структуру в виде периодических полос [8]. После прекращения лазерного воздействия наведенные решетки с течением времени релаксируют, в связи с чем их принято называть нестационарными или динамическими, причем скорость релаксации может сильно зависеть от свойств среды. В то же время при поперечном относительно направления распространения света перемещении градиентного светового поля в окрестности некоторой точки пространства интенсивность света в этой точке может изменяться по определенному закону, в связи с чем смещающиеся градиентные световые поля также можно считать динамическими. В [9] предложен метод захвата и сортировки частиц с помощью движущихся периодических интерференционных световых полос. В [10] показано, что в таком же качестве могут быть применены движущиеся интерференционные полосы с медленно изменяющимся во времени периодом. В [11] выявлено, что перемещение синусоидально модулированного по интенсивности в пространстве светового поля относительно заданной точки идентично по воздействию в этой точке полю, синусоидально модулированному по интенсивности во времени.

Для формирования световых полей со сложными распределениями интенсивности в настоящее время часто используются пространственные модуляторы света (ПМС, или SLM в англоязычной терминологии) в силу их универсальности, но они, в зависимости от конструкции, обладают одним или сразу несколькими изъянами: недостаточным разрешением, ограниченными размерами, невысоким КПД преобразования, низкой лучевой прочностью. Поэтому в некоторых конкретных случаях для формирования высокоинтенсивных градиентных световых полей целесообразно использовать рефрактивные оптические элементы, обладающие достаточно высокой лучевой прочностью. В настоящей работе продемонстрированы экспериментальные результаты по формированию нескольких многолучевых динамических градиентных световых полей интерференционного типа с помощью рефрактивных оптических элементов.

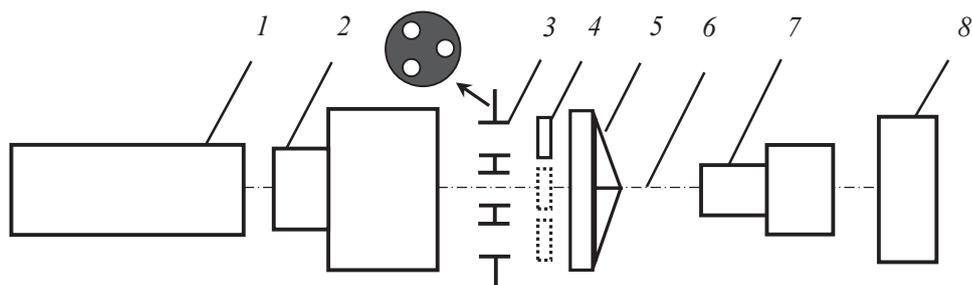


Рис. 1. Схема для формирования 3-лучевого динамического интерференционного светового поля: 1 – источник лазерного излучения; 2 – телескоп-коллиматор; 3 – диафрагма с тремя отверстиями; 4 – устройства для регулируемого смещения фазы световой волны; 5 – 3-гранная пирамида; 6 – зона существования 3-лучевого интерференционного поля; 7 – микроскоп; 8 – CCD-камера

Fig. 1. Scheme for formation of the 3-beam dynamic interference light field: 1 – laser radiation source; 2 – telescope-collimator; 3 – diaphragm with three holes; 4 – devices for regulated light wave phase shift; 5 – 3-edge pyramid; 6 – zone of existence of 3-beam interference field; 7 – microscope; 8 – CCD-camera

**Трехлучевое динамическое интерференционное поле.** Было предложено устройство для формирования 3-лучевого динамического светового поля<sup>1</sup> (рис. 1).

Источник лазерного излучения 1 и телескоп-коллиматор 2 формируют коллимированный когерентный световой пучок с аксиально симметричным распределением интенсивности, который направляется на диафрагму 3 с тремя круглыми отверстиями, расположенными в вершинах равностороннего треугольника, и полностью их освещает симметрично относительно оптической оси начального пучка. Пучок, проходящий через одно из трех отверстий, полностью перекрывает устройство 4 для регулируемого смещения фазы световой волны. В качестве такого устройства использовалась плоскопараллельная стеклянная пластина толщиной 1 мм, установленная с возможностью поворота на контролируемый угол, который лежит в плоскости, содержащей оптическую ось начального пучка и оптическую ось перекрываемого пластиной пучка. При повороте пластины на некоторый угол изменяется оптический путь пучка, проходящего сквозь нее, и, соответственно, возникает и изменяется разница в фазе этого пучка по отношению к двум другим. Параллельное смещение пучка, проходящего сквозь заклоненную пластину, в силу ее малой толщины также мало, и поэтому не оказывает существенного влияния на вид выходного интерференционного поля. После прохождения трех выделенных диафрагмой пучков сквозь 3-гранную пирамиду 5 (каждый из них проходит только через одну наклонную грань пирамиды) в области интерференции пучков за пирамидой формируется динамическое градиентное поле, все максимумы интенсивности которого при повороте пластины 4 по причине изменения разницы в фазе одного из пучков с двумя другими одновременно во всех поперечных сечениях смещаются в направлении, перпендикулярном одновременно плоскости поворота пластины и оптической оси начального пучка. Наличие динамического градиентного поля, формируемого в зоне интерференции 6, можно зарегистрировать с помощью микроскопа 7 и CCD-камеры 8.

На рис. 2 показана экспериментальная установка для формирования и исследования свойств 3-лучевого динамического градиентного поля (а), а также использованная в ней трехгранная пирамида (б), после которой каждый из трех лучей, выходящих из диафрагмы 3, распространяется под углом  $\gamma$  к оптической оси исходного светового пучка, падающего на диафрагму.

На рис. 3 показана рассчитанная теоретически зависимость распределения интенсивности в поперечном сечении формируемого интерференционного поля от разницы в фазе одного из трех интерферирующих пучков относительно двух других.

<sup>1</sup> Устройство для формирования динамического градиентного светового поля: пат. на пол. модель 7053 Респ. Беларусь: МПК8 G 02 F 1/01 / А. А. Рыжевич, Т. А. Железнякова, С. В. Солоневич; заявитель Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. – № u 20100682; заявл. 30.07.10; опубл. 28.02.11. Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. № 1 (78). – С. 223–224.

На рис. 4 представлена экспериментально зарегистрированная зависимость распределения интенсивности в поперечном сечении формируемого интерференционного поля от угла поворота стеклянной пластины толщиной 1 мм, обеспечивающего разницу в фазе одного из трех интерферирующих пучков, проходящего сквозь нее, относительно двух других. При изменении угла поворота пластины световые максимумы интерференционного поля контролируемо смещаются.

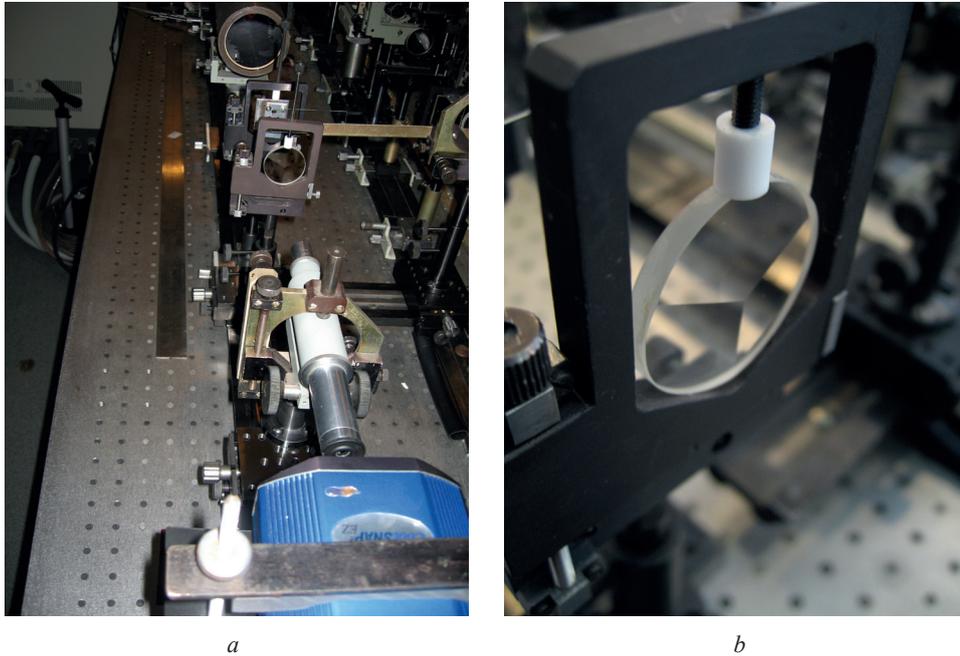


Рис. 2. Общий вид установки для формирования 3-лучевого динамического поля (а) и 3-гранной пирамиды (b) в ее составе

Fig. 2. General view of the setup for the 3-beam dynamic field formation (a) and the 3-edge pyramid within the setup (b)

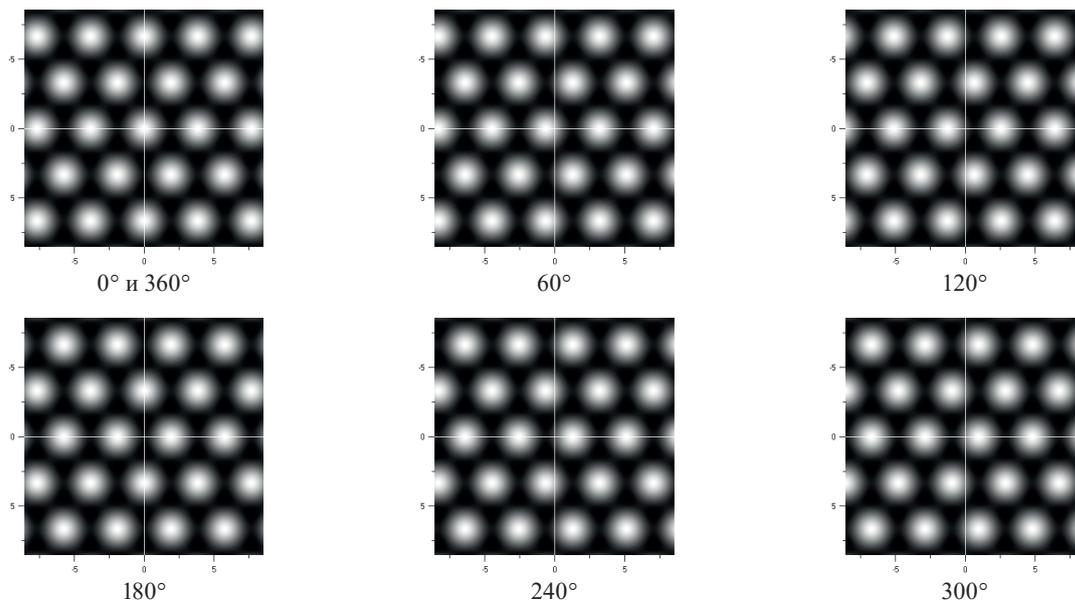


Рис. 3. Рассчитанная зависимость интенсивности светового поля в поперечном сечении от разницы в фазе одного из трех интерферирующих пучков

Fig. 3. Calculated dependency of the intensity of the light field in the transversal section on the phase difference in one of three interfering beams

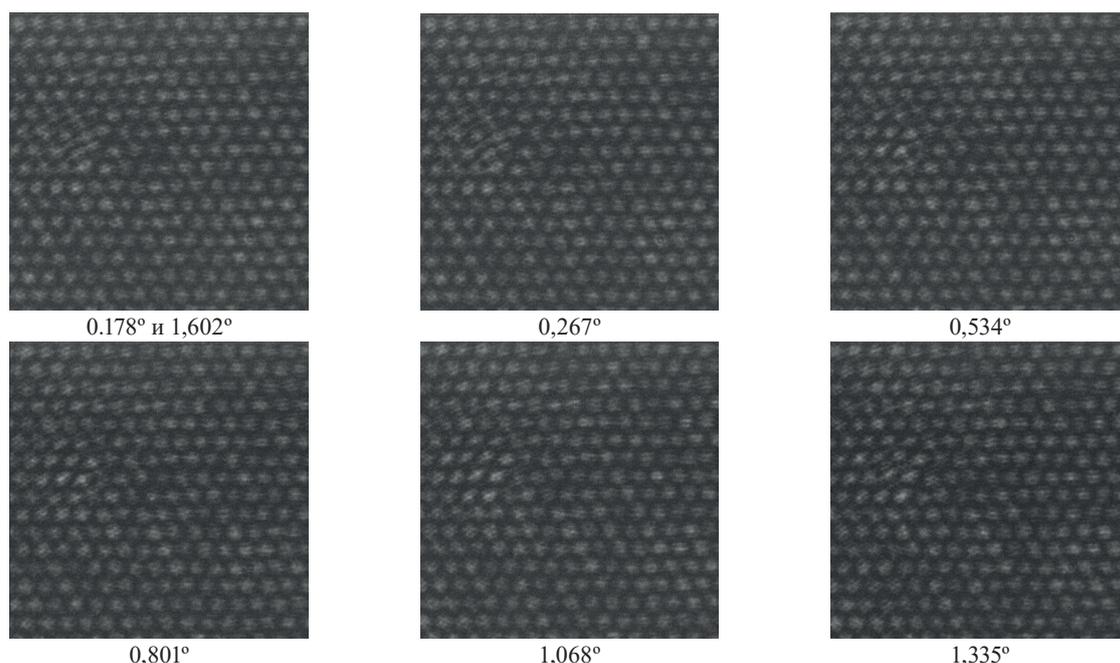


Рис. 4. Экспериментальная зависимость интенсивности светового поля в поперечном сечении от угла поворота стеклянной пластины, обуславливающего разницу в фазе одного из трех интерферирующих пучков

Fig. 4. Experimental dependency of the intensity of the light field in the transversal section on the glass plate rotation angle, that causes phase difference in one of the three interfering beams

Максимальное значение градиента интенсивности (рис. 5) в поперечном сечении 3-лучевого интерференционного поля существенно (примерно в 1,5 раза) больше, чем в интерференционном поле в виде параллельных полос, формируемом из того же исходного светового пучка определенной мощности с интенсивностью  $I_0$  при интерференции двух пучков. Направление, вдоль которого наблюдается максимальное значение градиента, и распределение градиента вдоль него показаны на рис. 6.

Радиальное распределение интенсивности в 3-лучевом интерференционном поле на рис. 6,  $b$  нормировано на осевой максимум интенсивности, значение которого в этом случае равно  $3I_0$ .

Добавление еще одного устройства для регулируемого смещения фазы (выделены пунктиром на рис. 1), перекрывающего пучок, проходящий через любое другое отверстие в диафрагме 3, позволяет производить управляемое перемещение максимумов интерференционного поля в любом направлении, лежащем в поперечной плоскости. Третье подобное устройство для регулируемого смещения фазы увеличивает возможный диапазон этого перемещения.

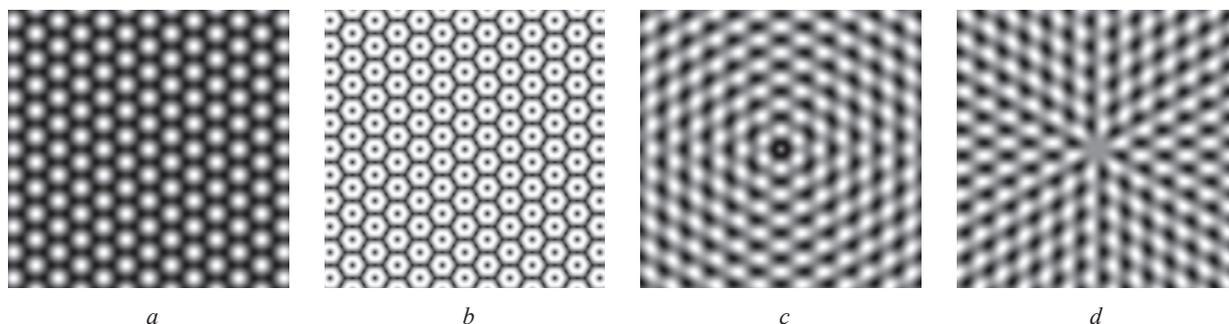


Рис. 5. Распределение в поперечном сечении 3-лучевого интерференционного поля:  $a$  – интенсивности;  $b$  – модуля градиента;  $c$  – радиальной;  $d$  – азимутальной компонент градиента

Fig. 5. Distribution in the transversal section of the 3-beam interference field:  $a$  – intensity;  $b$  – gradient module;  $c$  – radial;  $d$  – azimuthal component of the gradient

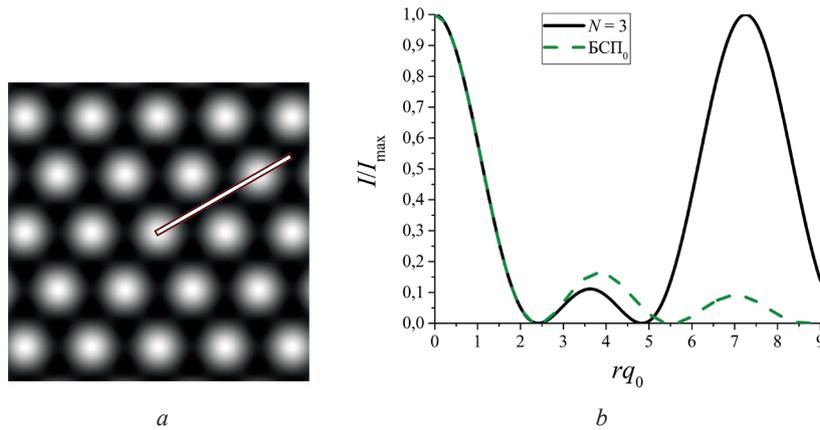


Рис. 6. Направление с наибольшим градиентом интенсивности (а) и радиальное распределение интенсивности вдоль этого направления (b) в 3-лучевом интерференционном поле

Fig. 6. Direction with maximal intensity gradient (a) and radial distribution of the intensity along this direction (b) in the 3-beam interference field

**Четырехлучевое динамическое интерференционное поле (квадропучок) с изменяемым периодом.** За основу метода формирования 4-лучевого перестраиваемого ячеистого светового поля был принят метод формирования квадроупучков с помощью пирамиды с четырьмя наклонными гранями, обладающей в идеале осевой симметрией 4-го порядка<sup>1</sup>. Поскольку период и размер световых максимумов ячеистого поля зависят от угла сходимости интерферирующих световых волн, для реализации усовершенствованного метода была собрана схема на основе слабоборасфокусированного телескопа, смонтированного из двух положительных сферических линз. Оптическая схема установки для формирования и исследования динамических квадроупучков показана на рис. 7.

Излучение гелий-неонового лазера  $I$ , представляющее собой гауссов пучок мощностью 1,5 мВт после расширения двукратным телескопом  $I^*$ , направлялось на оптическую систему, состоящую из положительных линз 2, 3 и стеклянной пирамиды 4, имеющей 4 грани, образующие с основанием пирамиды угол примерно  $5^\circ$ . Наиболее удобные для работы со схемой фокусные расстояния линз составляли  $f_1 = 10$  мм и  $f_2 = 125$  мм соответственно. Линзы размещались на фиксированном расстоянии друг от друга, примерно равном  $f_1 + f_2$ , формируя при этом телескоп-расширитель пучка. Пирамида 4 устанавливалась точно на оси светового пучка в плоскости, перпендикулярной оси пучка с помощью держателя  $4^*$ , обеспечивающего возможность юстировки пирамиды 4 по 5 координатам (3 – для поступательных смещений в 3 ортогональных плоскостях, 2 – для поворотов). Держатель  $4^*$  с пирамидой 4 помещался на узел 5, обеспечивающий контролируемые повороты держателя на малые углы относительно направления распространения оптического излучения. Необходимость введения дополнительного юстировочного узла 5 объясняется тем, что для плавной перестройки ячеистого светового поля нужно перемещать пирамиду вдоль направления распространения излучения до падения его на пирамиду. При этом вершина пирамиды, лежащая на оси падающего пучка, при продольном смещении пирамиды 4 с помощью держателя  $4^*$ , не должна смещаться с этой оси. Узел 5 осуществляет точное совмещение направления продольного смещения, задаваемого держателем  $4^*$  с осью начального пучка. Основной функцией данной оптической системы является формирование 4-пучкового светового поля с перестраиваемым углом схождения парциальных пучков, а дополнительной – коллимация выходящего светового пучка, т. е. уменьшение его расходимости с точки зрения изменения периода ячеистого поля. Перестройка угла схождения осуществляется при перемещении пирамиды 4 держателем  $4^*$  вдоль центральной оси падающего на нее светового пучка, как это показано на рис. 7.

<sup>1</sup> Устройство для формирования светового поля с ячеистым распределением интенсивности в поперечном сечении: пат. на пол. модель 7670 Респ. Беларусь: МПК<sup>8</sup> G 02 F 1/01 / С. В. Солоневич, А. А. Рыжевич, Н. С. Казак, Т. С. М. Аль-Сауд, С. Н. Аль-Ховайтер, М. К. Аль-Муханна; заявитель Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. – № u 20110312; заявл. 19.04.11; опублик. 30.10.11. Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. № 5 (82). – С. 279.

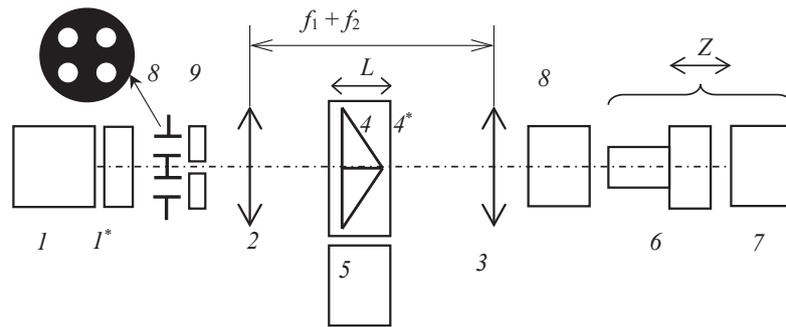


Рис. 7. Схема установки для формирования и исследования свойств 4-лучевого динамического интерференционного светового поля: 1 – источник лазерного излучения; 1\* – двукратный телескоп-коллиматор; 2, 3 – положительные линзы, образующие телескоп; 4 – 4-гранная пирамида; 4\* – держатель пирамиды; 5 – узел для юстировки держателя 4\*; 6 – микроскоп; 7 – CCD-камера; 8 – диафрагма с четырьмя отверстиями; 9 – устройства для регулируемого смещения фазы световых пучков, проходящих через отверстия диафрагмы 8

Fig. 7. Scheme of the setup for formation and study of properties of the 4-beam dynamic interference light field: 1 – laser radiation source; 1\* – 2x telescope-collimator; 2, 3 – positive lenses, forming a telescope; 4 – 4-edge pyramid; 4\* – pyramid holder; 5 – unit for holder 4\* adjustment; 6 – microscope; 7 – CCD-camera; 8 – diaphragm with four holes; 9 – devices for regulated shift of phase of the light beams passing through holes of the diaphragm 8

Выходное поле наблюдается и регистрируется с помощью 80-кратного микроскопа 6 и CCD-камеры CoolSnapEZ (США) 7. Для перевода интенсивности светового поля на выходе из микроскопа 6 в динамический диапазон CCD-камеры 7 использовался 4-дисковый аттенюатор 8 (Standa, Литва). Общий вид установки для формирования и исследования свойств 4-лучевого интерференционного светового поля и фотография 4-гранной пирамиды, используемой в составе установки, представлены рис. 8.

Небольшая продольная расфокусировка телескопа производится для частичной компенсации имеющейся разницы в углах отклонения направлений распространения парциальных волн на различных расстояниях от оптической оси светового пучка, генерируемого лазером 1 и пропускаемого затем через телескоп 1\* для уменьшения расходимости и увеличения диаметра

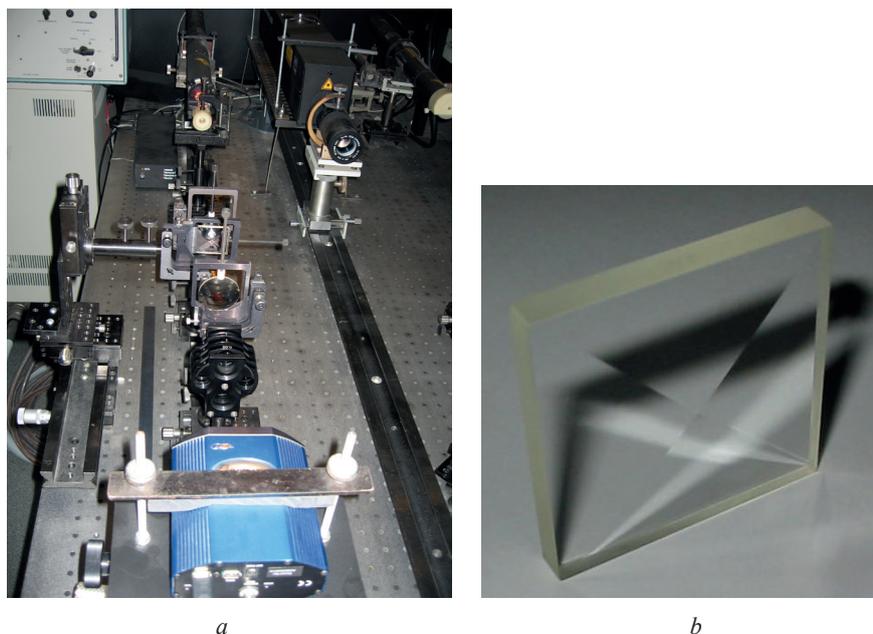


Рис. 8. Установка для формирования и исследования перестраиваемого 4-лучевого светового поля (a) и 4-гранная пирамида в ее составе (b)

Fig. 8. Setup for formation and study of the tunable 4-beam light field (a) and 4-edge pyramid within the setup (b)

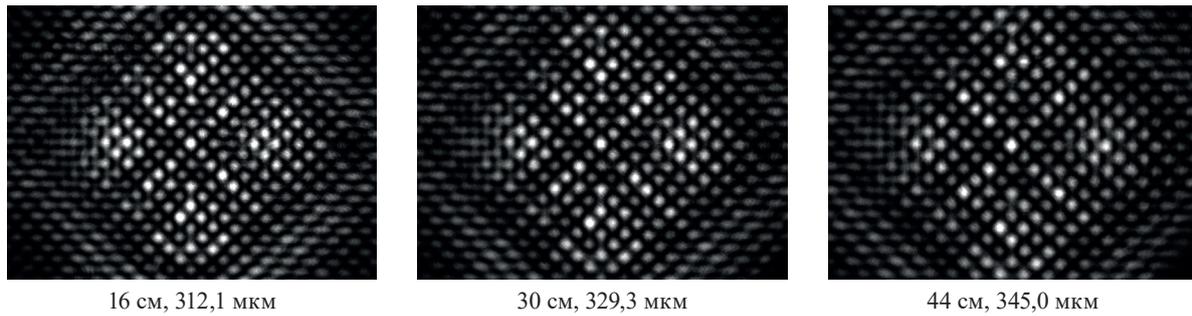


Рис. 9. Распределение интенсивности в поперечных сечениях перестраиваемого ячеистого светового поля на различных расстояниях от телескопической системы (величина в мкм – период ячеек)

Fig. 9. Intensity distribution in transversal sections of the tunable cellular light field at the different distances from the telescopic system (value in mkm – cell period)

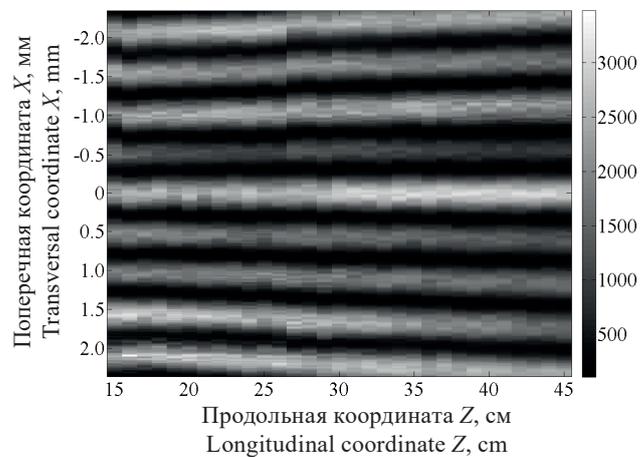


Рис. 10. Зависимость поперечного распределения интенсивности в квадропучке от продольной координаты

Fig. 10. Dependency of transversal intensity distribution in quadrobeam on the longitudinal coordinate

(см. рис. 7). Дело в том, что парциальные световые волны, шедшие до падения на пирамиду под различными углами, после прохождения сквозь пирамиду сходятся под различными углами, из-за чего периоды ячеек интенсивности в поперечных сечениях на различных расстояниях формируемого светового поля отличаются. Многократно уменьшить расходимость нельзя, поскольку при использовании телескопа  $I^*$  с такой же кратностью увеличивается диаметр пучка, и его нельзя затем преобразовать полностью короткофокусной линзой-объективом 2, имеющей малую входную апертуру.

Малым продольным смещением линзы с большим фокусным расстоянием можно добиться относительно слабой зависимости поперечных распределений выходного поля от продольной координаты. На рис. 9 показано распределение интенсивности в поперечных сечениях сформированного светового поля на различных расстояниях за выходной линзой 3 телескопической системы при фиксированном положении пирамиды внутри телескопа.

Из рис. 10 видно, что значения интенсивности в формируемом квадропучке вдоль продольной координаты изменяются незначительно. Эти изменения по крайней мере не превышают разницы между пиковыми значениями максимумов интенсивности из-за поперечной модуляции интенсивности, вызванной дифракцией света на ребрах пирамиды, сходящихся к ее вершине.

На рис. 11 показана зависимость периода ячеек интенсивности от продольной координаты в квадропучке, формируемом с помощью установки, схема которой представлена на рис. 7.

На протяжении 30 см изменение периода световых ячеек не превышает 15 %, поэтому в пределах нескольких миллиметров изменение в рамках многих приложений будет практически незаметным.

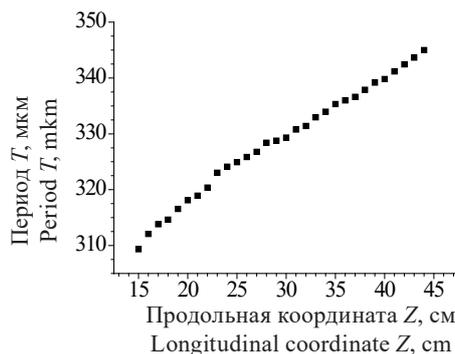


Рис. 11. Зависимость периода максимумов интенсивности в квадропучке от продольной координаты

Fig. 11. Dependency of the intensity maxima periods in the quadrobeam on the longitudinal coordinate

Из результатов экспериментов следует, что в сформированном ячеистом квадропучке распределение интенсивности может практически не зависеть от продольной координаты. Это очень удобно при лазерной обработке объектов с поверхностями, форма которых имеет даже сравнительно большие (порядка нескольких миллиметров) гладкие отклонения от плоскости. Отклонение формы от идеально плоской в этом случае не помешает образованию на обрабатываемой поверхности максимумов интенсивности, поскольку размеры, значения и период максимумов интенсивности почти не изменятся. При использовании ячеистого светового поля в терапевтических целях на поверхности биоткани при ее удалении на несколько миллиметров от выходного оптического элемента не произойдет значительного изменения значений максимумов интенсивности, т. е. не будет превышено, например, предельно допустимое значение экспозиционной дозы облучения.

При перемещении вершины пирамиды 4 (см. рис. 7) вдоль оптической оси пучка период световых ячеек-максимумов поля одновременно и единообразно изменяется во всех его поперечных сечениях. Исследована зависимость распределения интенсивности в выходном ячеистом лазерном поле от величины смещения пирамиды  $L$ . На рис. 12 показаны распределения интенсивности в поперечном сечении ячеистого квадропучка, полученные при нескольких различных поло-

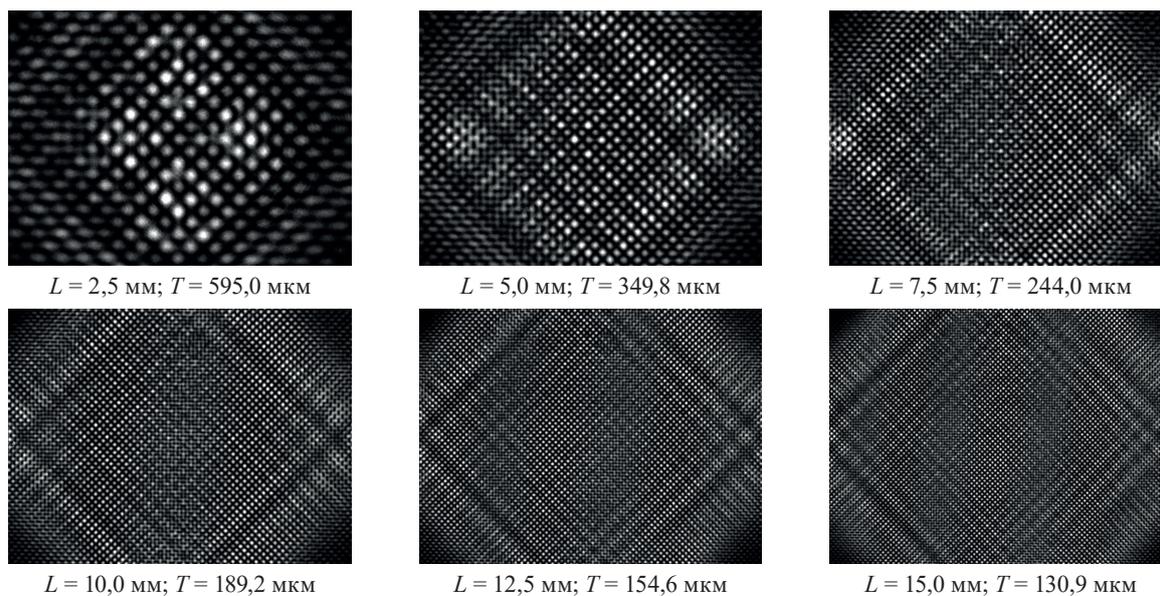
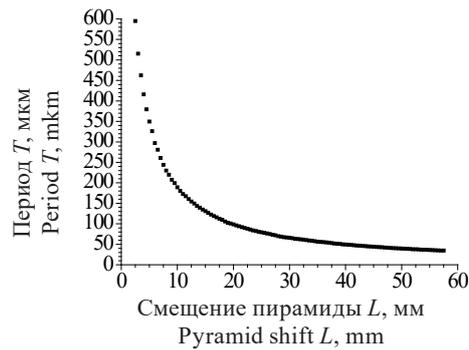
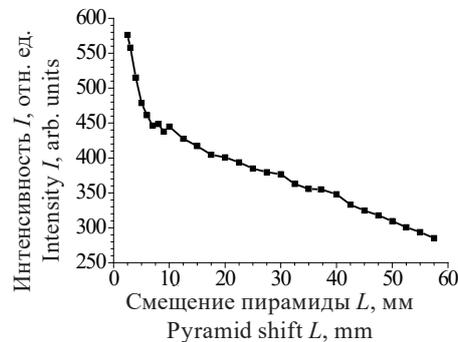


Рис. 12. Распределение интенсивности с периодом  $T$  ячеек в поперечном сечении ячеистого светового поля при различных смещениях  $L$  пирамиды

Fig. 12. Intensity distribution with cell period  $T$  in the transversal section of the cellular light field for different pyramid offsets  $L$

Рис. 13. Зависимость периода максимумов ячеистого квадропучка от смещения  $L$  пирамидыFig. 13. Dependency of the maxima period of the cellular quadropuchka on the pyramid shift  $L$ Рис. 14. Зависимость среднего значения интенсивности в сечении ячеистого поля от смещения  $L$  пирамиды относительно телескопической системыFig. 14. Dependency of the average value of intensity in section of the cellular field on the pyramid shift  $L$  relative to the telescopic system

жениях пирамиды относительно телескопической системы линз 2 и 3. Подобные распределения зарегистрированы во всем диапазоне значений величины  $L$ , возможных при данной конфигурации схемы и габаритных размерах оптических элементов и держателей, т. е. от 2,5 мм, когда начинается формирование квадропучка, до 57,5 мм, когда механические узлы препятствуют дальнейшему перемещению держателя пирамиды.

Для того чтобы полностью описать зависимость поперечной интенсивности выходного поля от смещения  $L$ , был построен график (рис. 13), на котором показана зависимость периода максимумов ячеистого поля от величины смещения  $L$  пирамиды. Первые 6 точек графика соответствуют 6 кадрам, приведенным на рис. 12.

Из серии данных, представленных рис. 12 и 13, следует, что при движении пирамиды 4 внутри телескопической системы от короткофокусной линзы 2 к длиннофокусной линзе 3 (см. рис. 7), т. е. при увеличении смещения  $L$ , период ячеистого светового поля монотонно увеличивается, причем зависимость периода от смещения описывается гиперболической функцией.

На рис. 14 показана зависимость средней интенсивности в центральной части поперечного сечения квадропучка от смещения пирамиды. Как видим, при увеличении угла схождения парциальных пучков интенсивность квадропучка в плоскости, находящейся на расстоянии 15 см от линзы 3, снижается, так как ячеистое поле при этом в исследуемой плоскости сечения формируется из более периферийных участков гауссова пучка, имеющих меньшую интенсивность.

Необходимо отметить, что для формирования качественного ячеистого квадропучка необходимо использовать качественно изготовленную пирамиду, все наклонные грани которой составляют с основанием одинаковый угол, а ребра наклонных граней сходятся в одной точке. Пирамида, использовавшаяся нами в эксперименте, не обладала этими свойствами. Ребра ее на-

клонных граней не сходились в одной точке, из-за чего в области вблизи вершины вначале формировался квазибипучок, образованный двумя сходящимися под углом световыми волнами, далее переходившими в квадрупучок.

Максимальное значение градиента интенсивности (рис. 15) в поперечном сечении 4-лучевого интерференционного поля примерно в 2 раза больше, чем в интерференционном поле в виде параллельных полос, формируемом при равных прочих параметрах из того же исходного светового пучка определенной мощности с интенсивностью  $I_0$  при интерференции двух пучков. Направление, вдоль которого наблюдается максимальное значение градиента, и распределение градиента вдоль этого направления показаны на рис. 16.

Использование (см. рис. 7) устройств 9 для управляемого изменения фазы двух световых пучков, проходящих через отверстия диафрагмы 8, позволяет смещать световые ячейки интерференционной картины в поперечной относительно оптической оси начального пучка плоскости. Таким образом, схема на рис. 7 дает возможность не только сформировать квадрупучок с регулируемым периодом интерференционных максимумов, но и управляемо перемещать эти максимумы в поперечной плоскости. Это можно использовать как для воздействия на биоткани в целях проведения приповерхностного воздействия, как это было описано в [11], так и для перемещения ансамблей микрочастиц градиентными силами, в том числе с осуществлением сортировки частиц по размерам либо по другим характеристикам.

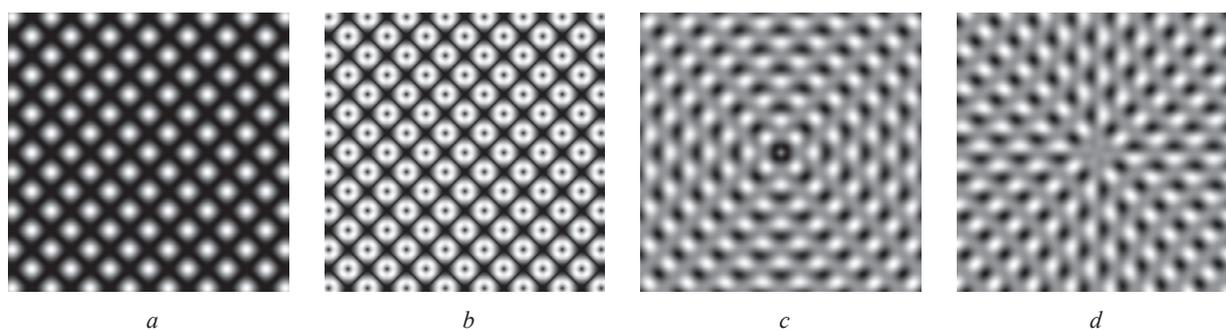


Рис. 15. Распределения в поперечном сечении 4-лучевого интерференционного поля:  $a$  – интенсивности;  $b$  – модуля градиента;  $c$  – радиальной;  $d$  – азимутальной компонент градиента

Fig. 15. Distribution in the transversal section of the 4-beam interference field:  $a$  – intensity;  $b$  – gradient module;  $c$  – radial component of the gradient;  $d$  – azimuthal component of the gradient

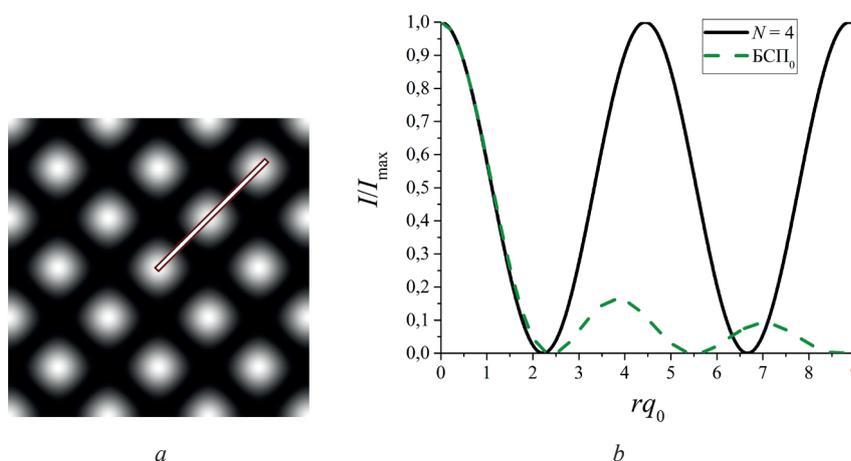


Рис. 16. Направление с наибольшим градиентом интенсивности ( $a$ ) и радиальное распределение интенсивности вдоль этого направления ( $b$ ) в 4-лучевом интерференционном поле

Fig. 16. Direction with maximal intensity gradient ( $a$ ) and radial distribution of the intensity along this direction ( $b$ ) in the 4-beam interference field

**Четырехлучевые динамические интерференционные поля с азимутальной модуляцией направлений распространения света.** Был предложен метод формирования динамического поля с ячеистым распределением интенсивности на основе двух бипризм, расположенных почти вплотную друг к другу и при этом независимо вращающихся с различными угловыми скоростями в плоскости, перпендикулярной оптической оси входного пучка<sup>1</sup>. Для экспериментальной реализации данного метода изготовлен специальный узел, показанный на рис. 17. Схема оптической установки для формирования и регистрации четырехлучевого интерференционного поля приведена на рис. 18.

Подшипники 4 (см. рис. 18) обеспечивают вращение бипризм 5 без биений. На наружной цилиндрической поверхности крышек 3 проточены пазы для пассивов, передающих вращение через редуктор от электродвигателя. Редуктор обеспечивает различные угловые скорости вращения для бипризм. Кронштейны 2 независимо крепятся к основанию 9 с возможностью юстировки бипризм 5 относительно друг друга. В основании сделаны отверстия для крепления узла для вращения бипризм на юстировочную платформу с целью юстировки узла относительно исходного пучка 1. Входной линейно поляризованный лазерный пучок 1 направляется на бипризмы 5

Рис. 17. Узел, обеспечивающий крепление, юстировку и независимое вращение двух расположенных последовательно вплотную друг к другу бипризм



Fig. 17. Unit, providing fastening, adjustment and independent rotation of the two biprisms located sequentially close to each other

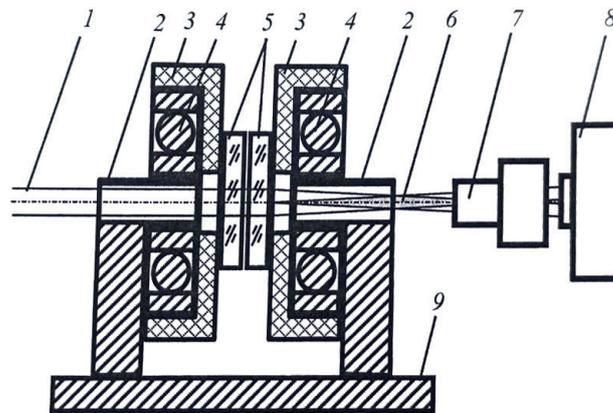


Рис. 18. Оптическая схема экспериментальной установки для формирования и исследования 4-лучевого динамического интерференционного поля: 1 – исходный коллимированный лазерный световой пучок с аксиально симметричным распределением интенсивности; 2 – кронштейны для крепления шарикоподшипников на основание; 3 – крышка для плотной посадки на шарикоподшипник; 4 – шарикоподшипники; 5 – бипризмы Френеля; 6 – зона существования динамического интерференционного поля; 7 – микроскоп; 8 – CCD-камера для регистрации формируемого поля; 9 – основание

Fig. 18. Optical scheme of the experimental setup for formation and study of the 4-beam dynamic interference field: 1 – original collimated laser light beam with the axially symmetric intensity distribution; 2 – support for ball-bearings attachment to the base; 3 – lid for the tight fitting to the ball-bearing; 4 – ball-bearings; 5 – Fresnel biprisms; 6 – zone of dynamic interference light field existence; 7 – microscope; 8 – CCD-camera for registration of the formed field; 9 – base

<sup>1</sup> Способ формирования переменного градиентного светового поля: пат. на изобретение 10393 Респ. Беларусь: МПК G 02F 1/01 / А. А. Рыжевич, Ю. А. Куприянова; заявитель Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. – № а 20050993; заявл. 17.10.2005; опубл. 28.02.2008. Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. № 1 (60). – Ч. 1. – С. 146–147.

параллельно их оси вращения сквозь отверстия в кронштейнах 2. В области 6 формируется динамическое интерференционное поле, которое увеличивается микроскопом 7 и регистрируется CCD-камерой 8.

На рис. 19 показаны результаты расчетов в различные моменты времени поперечного распределения динамического интерференционного поля, формируемого парой бипризмы, одна из которых неподвижна, а другая вращается вокруг оси. Первое распределение соответствует моменту, когда линия соприкосновения наклонных граней одной бипризмы перпендикулярна аналогичной линии другой бипризмы. Последняя – моменту, когда указанные линии параллельны друг другу. Выбирая угловую скорость вращения первой призмы так, чтобы она отличалась от скорости другой бипризмы, можно сформировать динамическое градиентное ячеистое световое поле для манипуляции микрочастицами, конфигурация которого будет изменяться со скоростью, соответствующей таким характеристикам микрочастиц, как масса и поляризуемость. Экспериментальные данные хорошо соответствуют расчету (рис. 20).

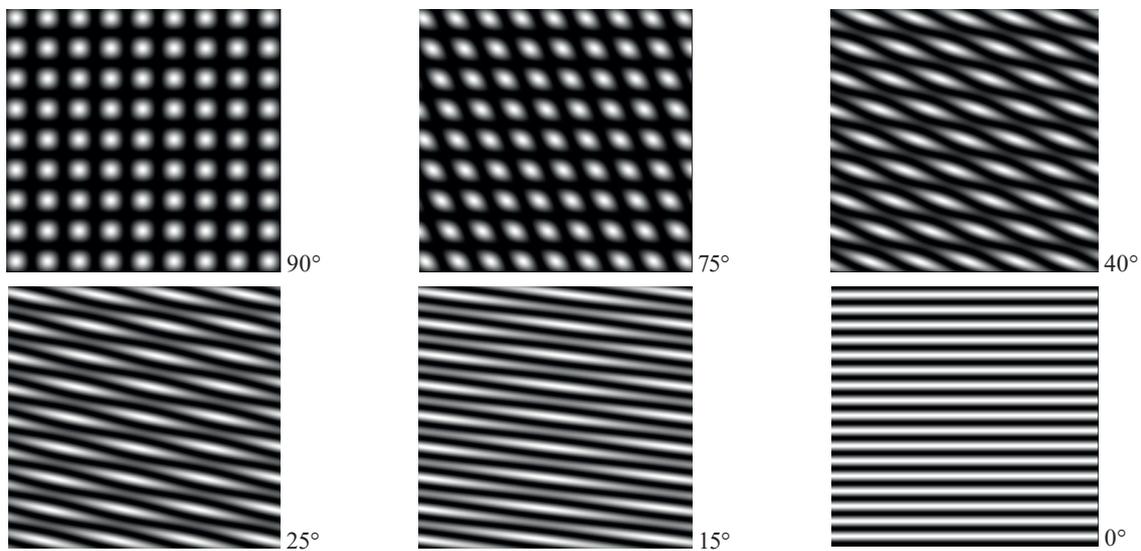


Рис. 19. Расчет динамического интерференционного светового поля при повороте одной из бипризм на указанный угол

Fig. 19. Calculation of the dynamic interference light field in the case of the rotation of one of the biprisms on the given angle

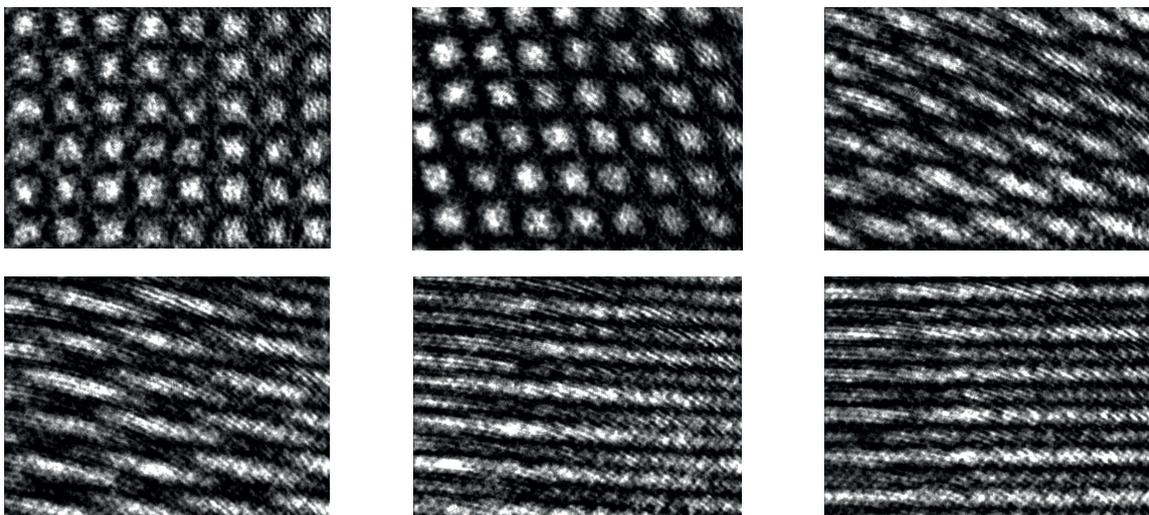
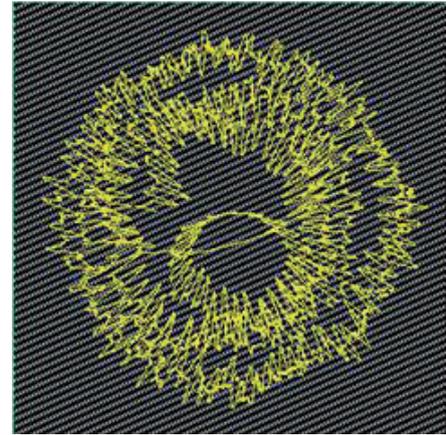


Рис. 20. Переменное градиентное поле в различные моменты времени (эксперимент)

Fig. 20. Alternating gradient field at different moments of time (experiment)

Рис. 21. Траектория микрочастицы, втянутой в максимум интенсивности динамического интерференционного поля

Fig. 21. Trajectory of a microparticle, drawn into the intensity maximum of the dynamic interference field



Поскольку характерный период формируемого динамического интерференционного поля составляет величину порядка нескольких микрометров, а в периодически расположенных минимумах интенсивность практически равна нулю, налицо высокий градиент интенсивности в формируемом переменном световом поле. На рис. 21 показана рассчитанная траектория частицы, втянутой в один из максимумов интенсивности динамического интерференционного поля, который движется и изменяется по форме при заданном соотношении скоростей вращения бипризм 4/100.

С помощью показанного ячеистого поля можно выполнять лазерный массаж биологических тканей, осуществляя выборочное воздействие на органеллы с определенными параметрами, либо перемешивание втянутых в локальные максимумы интенсивности светового поля микрочастиц в суспензии или эмульсии. Для этого необходимо выбрать определенное соотношение скоростей вращения бипризм.

**Динамические когерентные суперпозиции пяти, семи и более световых пучков.** При аксиально симметричной интерференции пяти, семи и более световых пучков с одинаковой фазой формируются непериодические, но аксиально симметричные интерференционные картины [6]. Осесимметричные поля из 5 и 7 пучков при этом можно считать квазипериодическими (рис. 22). При внесении искажений по фазе, углу, интенсивности одного или более интерферирующих пучков поля из пяти, семи и более пучков приобретают квазипериодическую структуру (рис. 23), которую также можно перемещать в поперечной плоскости соответствующим изменением фаз нескольких пучков. При этом такие искаженные поля вне зависимости от количества интерферирующих пучков, по всей видимости, приобретают осевую симметрию второго порядка.

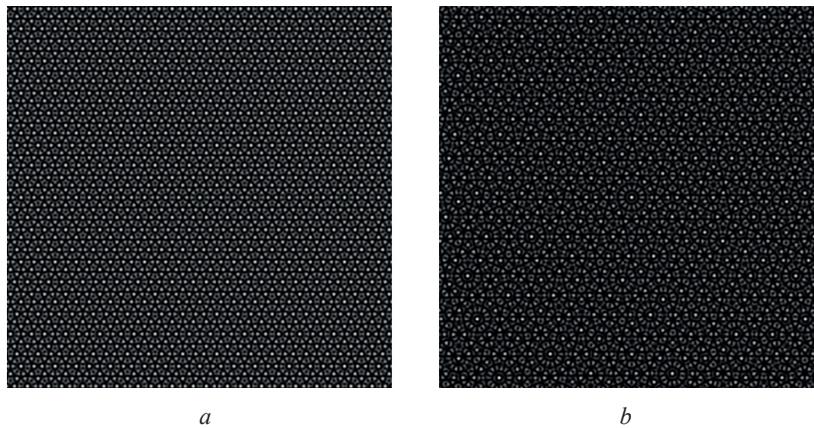


Рис. 22. Осесимметричные интерференционные поля, сформированные пятью (a) и семью (b) световыми пучками

Fig. 22. Axially symmetric interference fields, formed by five (a) and seven (b) light beams

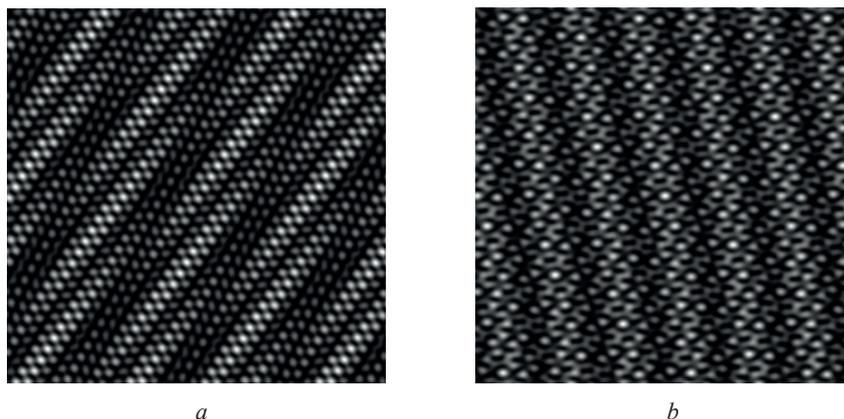


Рис. 23. Квазипериодические интерференционные поля из пяти (а) и восьми (b) несимметричных относительно оптической оси световых пучков (показана область поля  $20 \times 20$  мкм, длина волны излучения составляет 1 мкм)

Fig. 23. Quasi-periodic interference fields from five (a) and eight (b) light beams non-symmetrical relative to the optical axis ( $20 \times 20$  mm region of light field is shown, radiation wavelength is 1 mkm)

**Заключение.** Приведенные методы формирования динамических интерференционных световых полей позволяют создавать периодические и квазипериодические интерференционные структуры, управляемо перемещающиеся в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света. Максимумы интенсивности в данных структурах имеют значения, в несколько раз превышающие максимальную интенсивность в сечении исходного светового пучка, а размеры максимумов составляют от единиц до десятков микрометров, благодаря чему поля являются градиентными. В силу своих физических свойств описанные в работе световые поля могут применяться как для лазерной обработки материалов, так и в целях терапевтического воздействия на биоткани, например, для приповерхностного лазерофореза. Методы формирования динамических интерференционных световых полей являются достаточно эффективными, поскольку при наличии просветления на входных и выходных гранях рефрактивных оптических элементов практически не происходит потерь мощности излучения. Кроме того, используемые рефрактивные оптические элементы в силу своей высокой лучевой прочности дают возможность преобразовывать мощное лазерное излучение, благодаря чему полученными световыми полями можно облучать большие поверхности. Сами по себе оптические элементы, входящие в состав установок для формирования полей, имеют относительно невысокую стоимость изготовления, не требуют сложных юстировок, благодаря чему могут изготавливаться в большом количестве и при необходимости оперативно заменяться на запасные в условиях массового производства и обширной медицинской практики.

#### Список использованных источников

1. Ashkin, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure / A. Ashkin // *Phys. Rev. Lett.* – 1970. – Vol. 24, № 4. – P. 156–159. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.24.156>
2. Ashkin, A. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane // *Nature*. – 1987. – Vol. 330. – P. 769–771. <https://doi.org/10.1038/330769a0>
3. Arlt, J. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams / J. Arlt, T. Hitomi, K. Dholakia // *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*. – 2000. – Vol. 71, № 4. – P. 549–554. <https://doi.org/10.1007/s003400000376>
4. Optical micromanipulation using a Bessel light beam / J. Arlt [et al.] // *Opt. Commun.* – 2001. – Vol. 197, № 4–6. – P. 239–245. [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(01\)01479-1](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(01)01479-1)
5. Florjańczyk, M. Guiding of atoms in a travelling-wave laser trap formed by the axicon / M. Florjańczyk, R. Tremblay // *Opt. Commun.* – 1989. – Vol. 73, № 6. – P. 448–450. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(89\)90459-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(89)90459-8)
6. Methods of formation of gradient light fields / N. S. Kazak [et al.] // *Seventh International Conference on Laser and Laser-Information Technologies: Proceedings of SPIE, Suzdal, Russia, 22–26 June 2001.* – Suzdal, 2001. – Vol. 4644. – P. 520–529. <https://doi.org/10.1117/12.464190>

7. Optical Vortices: 3D Optical Vortex Lattices / D. A. Ikonnikov // *Ann. Phys.* – 2021. – Bd. 533, № 7. – Art. ID 2100114. <https://doi.org/10.1002/andp.202170023>
8. Ivakin, E. V. Self-diffraction of radiation by light-induced phase gratings / E. V. Ivakin, I. P. Petrovich, A. S. Rubanov // *Soviet J. Quantum Electron.* – 1973. – Vol. 3, № 1. – P. 52–55. <https://doi.org/10.1070/QE1973v003n01ABEH004741>
9. Katarkevich, V. M. Dynamics of the Trapping of Microparticles by an Interference Field on Exposure to Continuous and Pulsed Radiation / V. M. Katarkevich, A. N. Rubinov, T. S. Éfendiev // *J. Appl. Spectrosc.* – 2004. – Vol. 71. – P. 115–121. <https://doi.org/10.1023/b:japs.0000025358.77994.18>
10. Метод формирования управляемого градиентного светового поля с использованием электрооптического кристалла / С. В. Солоневич [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук.* – 2006. – № 5. – С. 115–118.
11. Рыжевич, А. А. Концепция устройства для проведения приповерхностного лазерофореза / А. А. Рыжевич, С. В. Солоневич, Т. А. Железнякова // *Приборы и методы измерений.* – 2014. – Т. 1, № 8. – С. 22–31.

## References

1. Ashkin A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Physical Review Letters*, 1970, vol. 24, no. 4, pp. 156–159. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.24.156>
2. Ashkin A., Dziedzic J. M., Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams. *Nature*, 1987, vol. 330, pp. 769–771. <https://doi.org/10.1038/330769a0>
3. Arlt J., Hitomi T., Dholakia K. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2000, vol. 71, no. 4, pp. 549–554. <https://doi.org/10.1007/s003400000376>
4. Arlt J., Garcés-Chavez V., Sibbett W., Dholakia K. Optical micromanipulation using a Bessel light beam. *Optics Communication*, 2001, vol. 197, no. 4–6, pp. 239–245. [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(01\)01479-1](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(01)01479-1)
5. Florjańczyk M., Tremblay R. Guiding of atoms in a travelling-wave laser trap formed by the axicon. *Optics Communications*, 1989, vol. 73, no. 6, pp. 448–450. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(89\)90459-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(89)90459-8)
6. Kazak N. S., Ryzhevich A. A., Katranji E. G., Khilo A. N. Methods of formation of gradient light fields. *Seventh International conference on Laser and Laser-Information technologies: Proceedings of SPIE, Suzdal, Russia, 22–26 June 2001*. Suzdal, 2001, vol. 4644, pp. 520–529. <https://doi.org/10.1117/12.464190>
7. Ikonnikov D. A., Myslivets S. A., Arkhipkin V. G., Vyunishev A. M. Optical Vortices: 3D Optical Vortex Lattices. *Annalen der Physik*, 2021, Bd. 533, no. 7, art. ID 2100114. <https://doi.org/10.1002/andp.202170023>
8. Ivakin E. V., Petrovich I. P., Rubanov A. S. Self-diffraction of radiation by light-induced phase gratings. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1973, vol. 3, no. 1, pp. 52–55. <https://doi.org/10.1070/QE1973v003n01ABEH004741>
9. Katarkevich V. M., Rubinov A. N., Éfendiev T. S. Dynamics of the Trapping of Microparticles by an Interference Field on Exposure to Continuous and Pulsed Radiation. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2004, vol. 71, pp. 115–121. <https://doi.org/10.1023/b:japs.0000025358.77994.18>
10. Solonevich S. V., Aleshko P. M., Ryzhevich A. A., Mashchenko A. G. Method of formation of controlled gradient light field using electrooptical crystal. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2006, no. 5, pp. 115–118 (in Russian).
11. Ryzhevich A. A., Solonevich S. V., Zheleznyakova T. A. Conception of a device for carrying out of near-surface laser phoresis. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2014, vol. 1, no. 8, pp. 22–31 (in Russian).

## Информация об авторах

**Рыжевич Анатолий Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь); доцент кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники БГУ (пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Республика Беларусь). E-mail: [tol@dragon.bas-net.by](mailto:tol@dragon.bas-net.by), [tol222@mail.ru](mailto:tol222@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-5463-0054>

**Балыкин Игорь Валерьевич** – научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [b97@dragon.bas-net.by](mailto:b97@dragon.bas-net.by). <https://orcid.org/0000-0002-6763-1136>

**Железнякова Татьяна Александровна** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и аэрокосмических технологий БГУ (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [t.zhe@inbox.ru](mailto:t.zhe@inbox.ru). <https://orcid.org/0009-0003-0197-494X>

## Information about the authors

**Anatol A. Ryzhevich** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Associate Professor of the Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [tol@dragon.bas-net.by](mailto:tol@dragon.bas-net.by), [tol222@mail.ru](mailto:tol222@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0002-5463-0054>

**Igor V. Balykin** – Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [b97@dragon.bas-net.by](mailto:b97@dragon.bas-net.by). <https://orcid.org/0000-0002-6763-1136>

**Tatyana A. Zheleznyakova** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor at the Department of Physics and Aerospace Technologies, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [t.zhe@inbox.ru](mailto:t.zhe@inbox.ru). <https://orcid.org/0009-0003-0197-494X>

**Казак Николай Станиславович** – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, научный консультант ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lod@dragon.bas-net.by. <https://orcid.org/0000-0002-3346-5352>

**Nikolai S. Kazak** – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Scientific Consultant of the SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lod@dragon.bas-net.by. <https://orcid.org/0000-0002-3346-5352>