

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-08-3-13

УДК 621.372.821.3, 621.383, 621.391.822

Эффект поворота спеклов при интерференции оптических вихрей и волноводных мод волоконного световода

Дмитрий Владимирович Кизеветтер¹✉,
Никита Владимирович Ильин²

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

¹dmitrykiesewetter@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5152-4352>

²nvilyn@gmail.com <https://orcid.org/0009-0002-5717-3570>

Аннотация

Предмет исследования. Интерференция волноводных мод и оптических вихрей в многомодовых волоконных световодах и свободном пространстве, спекл-структуры, возникающие в результате такой интерференции. **Цель работы.** Построение простейшей физической модели для объяснения эффекта поворота спеклов, формируемых выходящим излучением многомодового световода при перемещении плоскости наблюдения и оценка параметров вращения спеклов на основании экспериментального исследования. **Метод.** Численное моделирование было выполнено в приближении линейно-поляризованных модовых групп для волноводных мод и оптических вихрей многомодового волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления. Для экспериментального исследования оптические вихри и волноводные моды световода возбуждались наклонным сфокусированным лазерным пучком, смещённым относительно оси. Выходящее излучение проецировалось на фотоприёмную матрицу телевизионной камеры. Были получены распределения интенсивности выходящего излучения при различном расстоянии от камеры до фокусирующего объектива. **Основные результаты.** На простейшей физико-математической модели объяснён эффект вращения пятен спеклов, возникающих вследствие интерференции оптических вихрей и основной волноводной моды при продольном перемещении вдоль оси световода. Показано, что полученный результат численного моделирования можно обобщить на более общий случай интерференции различных волноводных мод. Экспериментально подтверждён эффект поворота спеклов выходящего из световода излучения при перемещении плоскости наблюдения. Визуализировано движение пятен спеклов и определены параметры их вращения. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты могут быть использованы для проектирования волоконно-оптических датчиков, в частности — спекл-интерферометров.

Ключевые слова: волоконный световод, оптический вихрь, спекл, интерференция, численное моделирование

Ссылка для цитирования: Кизеветтер Д.В., Ильин Н.В. Эффект поворота спеклов при интерференции оптических вихрей и волноводных мод волоконного световода // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 8. С. 3–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-3-13>

Коды OCIS: 060.2310, 120.6150.

The effect of speckle rotation at the interference of optical vortices and waveguide modes of an optical fiber

DMITRY V. KIESEWETTER¹✉, NIKITA V. ILYIN²

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

¹dmitrykiesewetter@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5152-4352>

²nvilyn@gmail.com <https://orcid.org/0009-0002-5717-3570>

Abstract

Subject of study. Interference of waveguide modes and optical vortices in multimode optical fibers and free space, as well as speckle structures resulting from such interference. **Aim of study.** Creation of the simplest physical model to explain the effect of rotation of speckles formed by the outgoing radiation of a multimode fiber when moving the observation plane and estimation of speckle rotation parameters based on the experimental study. **Method.** Numerical simulation of the effect was performed in the approximation of linearly polarized mode groups for waveguide modes and optical vortices of a multimode optical fiber with a step index profile. For the experimental study, optical vortices and waveguide modes of the optical fiber were excited by an oblique focused laser beam shifted relative to the axis. The outgoing radiation was projected onto the photodetector matrix of the camera. The intensity distribution of the outgoing radiation at different distance from the camera to the focusing lens were obtained. **Main results.** The effect of rotation of speckles resulting from interference of optical vortices and the main waveguide mode during longitudinal movement along the axis of the fiber is explained using the simplest physical model. It is shown that the obtained results of numerical simulation can be generalized to the more general case of interference of various waveguide modes and vortices. The effect of rotation of speckles of radiation coming out of the optical fiber when moving the observation plane has been experimentally confirmed. The trajectory of the motion of the speckles when moving the observation plane near the lens focus was visualized and determined, and the rotation parameters were calculated. **Practical significance.** The results obtained in this work can be used to design fiber-optic sensors, in particular speckle interferometers.

Keywords: optical fiber, optical vortex, speckle, interference, numerical simulation

For citation: Kiesewetter D.V., Ilyin N.V. The effect of speckle rotation at the interference of optical vortices and waveguide modes of an optical fiber [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 8. P. 3–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-3-13>

OCIS codes: 060.2310, 120.6150.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические пучки, несущие орбитальный угловой момент, в том числе, оптические вихри в волоконных световодах, представляют всё больший интерес для систем связи и других применений [1–3]. Существенным вкладом в развитие теории возникновения, распространения оптических вихрей в волоконных световодах являются работы, опубликованные в журнале «Письма в ЖТФ» в 90-е годы, как, например, работы [4, 5]. Некоторые экспериментально полученные интерференционные картины для различных комбинаций волн световода, вопросы генерации и распространения оптических вихрей, а также их

применение рассмотрены в обзоре [6]. Генерация вихревых бесселеподобных пучков, основанная на использовании волоконной моды высокого порядка, представлена в работе [7]. Генерация оптического вихря в кольцевом волокне с твёрдой сердцевинной с использованием акустически индуцированной волоконной решётки — в [8], мощных пикосекундных оптических вихревых пучков — в [9, 10], оптического вихря, зависящего от вращения всего волокна — в [11], вихревой волоконный лазер на основе длиннопериодных решёток Брэгга — в [12, 13].

В обзорной статье [3] обсуждается теория поляризационных и фазовых вихрей, а также

генерация вихревого пучка в оптическом волокне и его применение, в [14] — рассмотрены вихри в микроструктурированных оптических волокнах. Генерация суперконтинуума оптических вихрей в фотонно-кристаллическом волокне с кольцевой сердцевинкой описана в [15]. Распространение оптических вихрей в кольцевых резонаторах рассматривается в [16], в системе скрученных анизотропных и многоспиральных оптических волокон — в [17].

Основные свойства оптических вихрей в волоконных световодах аналогичны свойствам пучков оптического излучения с орбитальным угловым моментом — оптическим вихрям в свободном пространстве. Теоретические основы и практическое использование оптических вихрей в системах связи даны в обзоре [18]. Подробное теоретическое рассмотрение принципа работы систем связи на основе оптических вихрей приведено в обзоре [2], в том числе и с использованием волоконных световодов. Результаты исследования мультивихревых гауссовых пучков представлены в работе [19], оптических вихревых пучков с асимметричным спектром орбитального углового момента — в [20], суперпозиции двух и более вихрей при различных условиях распространения — в [21, 22]. Из указанных обзоров и научных статей следует, что оптические вихри уже находят применение в системах связи, а такие системы имеют большие перспективы дальнейшего развития.

Однако сведения об изменении свойств спекл-полей выходящего из волоконного световода излучения при наличии оптических вихрей немногочисленные. Так, например, в [23] показано, что уровень модового шума, возникающего при пространственной фильтрации выходящего из многомодового волоконного световода (МВС) излучения, формируемого волноводными модами и оптическими вихрями, отличается в несколько раз вследствие различия характерных размеров спекл-пятен.

В [24, 25] установлено, что характер движения пятен интерференционной картины выходящего излучения — спекла, при перемещении плоскости наблюдения вблизи выходного торца зависит от типа распространяющихся волн: волноводных мод или оптических вихрей. В первом случае — это квазихаотическое

движение пятен, во втором случае — может иметь место направленное круговое движение пятен вокруг оси, совпадающей с осью световода. Это даёт возможность использовать группы оптических вихрей в МВС, в частности, для улучшения параметров волоконно-оптических датчиков.

Принимая во внимание, что волновой фронт оптических вихрей является спиралеобразным и при интерференции с плоской волной образует спираль, эффект поворота пятен спекла интерференционной картины группы оптических вихрей и волноводных мод при перемещении плоскости наблюдения является ожидаемым. Однако теоретическое рассмотрение или численное моделирование этого эффекта никем не производилось.

Численное моделирование распределения интенсивности излучения, выходящего из МВС при большом количестве интерферирующих волн, представляет серьёзную сложность [26] и требует значительных затрат машинного времени. В частности, в [26] рассмотрены случаи интерференции только двух волн на различном расстоянии от выходного торца в приближении линейно-поляризованных модовых групп (LP). Теоретически можно рассматривать распределение интенсивности внутри сердцевинки МВС и её изменение при перемещении вдоль оси световода суммированием напряжённости поля всех распространяющихся волн. Но даже при заранее рассчитанных собственных числах и постоянных распространения, эта задача также представляет некоторую сложность.

Учитывая актуальность использования оптических вихрей в волоконно-оптических системах [1–3], необходимо дальнейшее изучение различных эффектов, обусловленных влиянием оптических вихрей, в частности, ранее выявленного эффекта вращения пятен спеклов при перемещении плоскости наблюдения вблизи поверхности выходного торца световода, не имеющего в настоящее время научного объяснения.

Поэтому целью работы является построение простейшей физической модели для объяснения эффекта поворота спеклов, формируемых выходящим излучением многомодового световода при перемещении плоскости наблюдения и оценка параметров вращения спеклов на основании экспериментального исследования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Основной проблемой исследования спеклов методом численного моделирования является сложность установления взаимосвязи выявленных явлений с различными параметрами МВС, в частности, практически невозможно определить, какие параметры группы электромагнитных волн обуславливают вращение пятен спеклов. Для объяснения эффекта вращения пятен спеклов при перемещении плоскости наблюдения, упомянутого выше, целесообразно упростить существующие физико-математические модели и на основании упрощённых численных экспериментов выявить условия возникновения указанного эффекта.

Используем выражения, описывающие напряжённость электрического поля, для волноводных мод и оптических вихрей, обобщённые в обзоре [2]:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} HE_{l+1,m}^e \\ HE_{l+1,m}^o \end{Bmatrix} &= \\ &= R_{l,m}(r) \exp(i\beta z) \begin{Bmatrix} \hat{x} \cos(l\theta) - \hat{y} \sin(l\theta) \\ \hat{x} \sin(l\theta) + \hat{y} \cos(l\theta) \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} EH_{l-1,m}^e \\ EH_{l-1,m}^o \end{Bmatrix} &= \\ &= R_{l,m}(r) \exp(i\beta z) \begin{Bmatrix} \hat{x} \cos(l\theta) + \hat{y} \sin(l\theta) \\ \hat{x} \sin(l\theta) - \hat{y} \cos(l\theta) \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где HE , EH — типы волноводных мод, $R_{l,m}(r)$ — радиальное распределение напряжённости электрического поля, l, m — азимутальный и радиальный индекс моды ($l = 0, 1, 2, \dots; m = 1, 2, 3, \dots$), r, θ, z — координаты цилиндрической системы, в которой ось z совпадает с осью световода, $\hat{x}$ и $\hat{y}$ — единичные векторы декартовой системы координат, e, o — индексы, обозначающие чётную и нечётную моду, β — постоянная распространения моды с индексами l, m, i — мнимая единица.

В приближении линейно-поляризованных модовых групп, принимая во внимание, что LP -моды являются суперпозицией векторных полей HE и EH мод [2, 6]:

$$\begin{cases} LP_{l,m,x}^e = EH_{l-1,m}^o + EH_{l+1,m}^o \\ LP_{l,m,x}^o = EH_{l-1,m}^e - EH_{l+1,m}^e \end{cases} \quad (3)$$

для выбранного направления поляризации, например, по оси x , имеет место [2, 6]:

$$\begin{cases} LP_{l,m,x}^e = \hat{x} R_{l,m}(r) \cos(l\theta) \exp(i\beta z) \\ LP_{l,m,x}^o = \hat{x} R_{l,m}(r) \sin(l\theta) \exp(i\beta z) \end{cases}. \quad (4)$$

Оптический вихрь с линейной поляризацией $LP_{l,m,x}^v$ может быть представлен как комбинация двух $LP_{l,m,x}$ модовых групп [1, 2]:

$$LP_{l,m,x}^e + i LP_{l,m,x}^o = \hat{x} R_{l,m}(r) \exp(i\theta) \exp(i\beta z). \quad (5)$$

Два выражения (4) можно объединить в одно, например, в виде:

$$LP_{l,m,x} = \hat{x} R_{l,m}(r) \cos(l\theta + \theta_{l,m}) \exp(i\beta z), \quad (6)$$

где $\theta_{l,m}$ — азимутальная фаза LP модовой группы с индексами l, m .

Для оптического вихря выражение (5) также может быть представлено в виде:

$$LP_{l,m,x}^v = \hat{x} R_{l,m}(r) \exp(i(l\theta + \theta_{l,m})) \exp(i\beta z), \quad (7)$$

где $\theta_{l,m}$ — азимутальная фаза вихря с индексами l, m .

Для выявления закономерностей перемещения пятен спеклов в плоскости, перпендикулярной оси световода при её перемещении по оси z , рассмотрим несколько случаев интерференции большого числа различных волн: первый — оптических вихрей и одной $LP_{0,1}$ модовой группы, формируемой основной волноводной модой $HE_{1,1}$, второй — только волноводных мод, третий — только оптических вихрей. Будем рассматривать азимутальную зависимость суммарной напряжённости E от координаты z , положив $r = \text{const}$. В простейшем случае исключим рассмотрение радиальной зависимости, все группы $LP_{l,m,x}^v$ заменим на одну группу $LP_{l,1,x}^v$, так как все они имеют одинаковую азимутальную зависимость. Далее по тексту индексы $l(m)$ и x опускаем и используем обозначение $LP_{l,1}^v$. Фаза каждой LP группы по времени, в общем случае, случайная. Поэтому дополнительно введём амплитудный коэффициент A_l как комплексную величину с единичным модулем и случайной фазой.

Для случая интерференции множества LP групп оптических вихрей и одной $LP_{0,1}$ модовой группы, опять-таки в качестве про-

стейшей модели, положим, что количество интерферирующих групп равно N и это существенно меньше общего возможного количества распространяющихся модовых групп в данном МВС, а разность между любыми постоянными распространения LP_l^v групп существенно меньше, чем разность постоянных распространения $\Delta\beta$ этих LP_l^v групп и $LP_{0,1}$ модовой группы. Такое приближение допустимо, например, если угол распространения LP_l^v групп в МВС близок к апертурному углу. Тогда постоянная распространения $\beta_{0,1}$ имеет значение, близкое к $2\pi n_1/\lambda$, где n_1 — показатель преломления сердцевинны МВС, λ — длина волны излучения, постоянные распространения вихрей β_v — к $2\pi n_2/\lambda$, где n_2 — показатель преломления оболочки МВС, а разность $\beta_{0,1} - \beta_v$ — к $2\pi(n_1 - n_2)/\lambda$. Суммарную напряжённость электрического поля в этом случае можно описать выражением:

$$E_v = A_{0,1} \exp(i\beta_{0,1}z) + \sum_{l=1}^N A_l \exp(i(l\theta + \theta_l)) \exp(i\beta_v z). \quad (8)$$

Выражение для угловой зависимости интенсивности $I(\theta)$ суммы напряжённости волн можно записать в виде:

$$I(\theta) = E(\theta)E^*(\theta). \quad (9)$$

Пусть $N = 100$, $|A_l| = 1$, $|A_{0,1}| = 100$. Тогда, из формулы (8) с учётом (9) получаем расчётную азимутальную зависимость $I(\theta)$, приведённую на рис. 1 для четырёх значений $\Delta\beta z$ ($\Delta\beta z = 0, \pi/3, \pi/2, \pi$). Графики приведены в единицах θ/π по оси Ox , т.е., например, 0,1 соответствует повороту на угол $\pi/10$. Использование нормированных безразмерных координат позволяет лучше понять сущность рассматриваемого явления, не связывая простейшую модель с конкретными параметрами какого-либо световода.

Как следует из рис. 1, имеет место смещение максимумов азимутальной зависимости $I(\theta)$ при изменении разности фаз $\Delta\beta z$. Величину $\Delta\beta z$ можно назвать нормированным смещением (безразмерная величина), а изменение $\Delta\beta z$ от 0 до 2π обусловлено увеличением расстояния z , начиная от некоторого расстояния z_0 , при котором $\Delta\beta z_0 = 2\pi n$, где n — целое число.

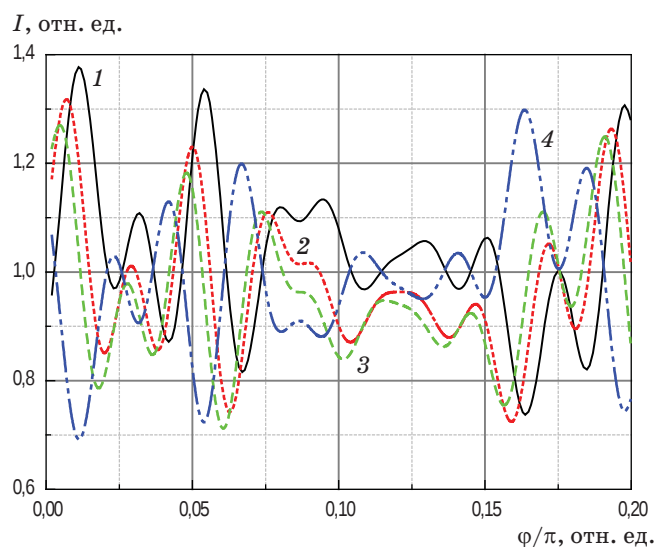


Рис. 1. Расчётное угловое распределение интенсивности при $\Delta\beta z$. Кривая 1 — 0, 2 — $\pi/3$, 3 — $\pi/2$, 4 — π

Fig. 1. Calculated angular intensity distribution at $\Delta\beta z$: curve 1 — 0, 2 — $\pi/3$, 3 — $\pi/2$, 4 — π

Наиболее наглядно на рис. 1 смещение по азимутальному углу θ (т.е. поворот) зависимостей $I(\theta)$ при изменении $\Delta\beta z$ видно для первых двух максимумов (от 0 до $0,1 \theta/\pi$). Следует также отметить, что поворот зависимостей $I(\theta)$ сопровождается некоторым изменением формы всей зависимости $I(\theta)$. Характер полученных зависимостей соответствует характеру экспериментально измеренных азимутальных зависимостей [24, 25], полученных при перемещении плоскости наблюдения вблизи выходного торца с помощью специальной оптической системы.

На основании графиков, приведённых на рис. 1, была определена зависимость углового (азимутального) положения максимумов $\theta_{\max}/\pi$ интенсивности от нормированного смещения $\Delta\beta z$ плоскости наблюдения (рис. 2). Для всех трёх ветвей зависимости (рис. 2) угол наклона составляет приблизительно $-0,004$, т.е. имеет место линейная зависимость $\theta_{\max}/\pi$ от $\Delta\beta z$, что в цилиндрической системе координат соответствует движению точки $\theta_{\max}$ от z по круговой спирали ($r = \text{const}$). В ненормированных координатах, например, для волоконного световода с кварцевой сердцевинной и полимерной оболочкой, с числовой апертурой $NA = 0,5$ при длине волны $0,6328$ мкм в рассмотренном случае поворот азимутальной зависимости

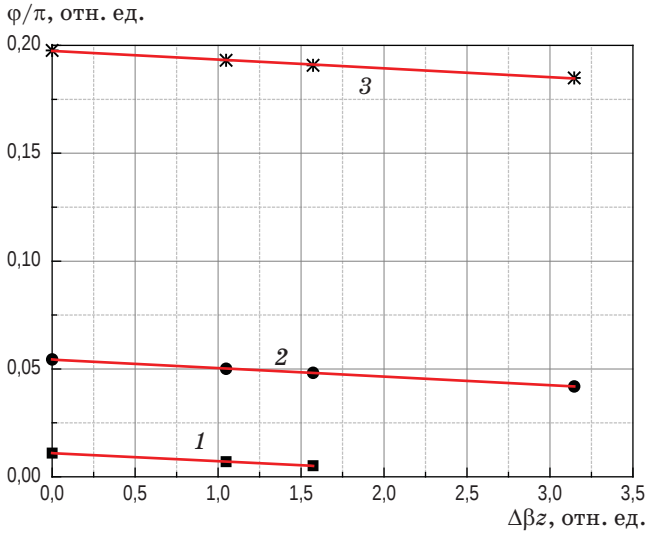


Рис. 2. Расчётное нормированное угловое положение максимумов интенсивности зависимости $I(\theta)$ от нормированного смещения $(\Delta\beta z)$ плоскости наблюдения вблизи углов (θ/π) : 1 — 0,01, 2 — 0,05, 3 — 0,19

Fig. 2. The calculated normalized angular location of the intensity maxima of the dependence $I(\theta)$ on the normalized displacement $(\Delta\beta z)$ of the observation plane near the angles (θ/π) : 1 — 0,01, 2 — 0,05, 3 — 0,19

$I(\theta)$ на угол 180° происходит приблизительно при смещении по оси z на 150 мкм.

Было также выполнено численное моделирование зависимостей $I(\theta)$ при случайном равномерном распределении постоянных распространения LP^v_l в пределах $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$, а также для величин β_l , полученных численным решением характеристического уравнения при различных нормированных частотах ($V = a_c k_0 \text{NA}$, где a_c — радиус сердцевины МВС), т.е. не используя приближение $\beta_v = \text{const}$. Установлено, что при любом количестве N интерферирующих LP^v_l групп эффект поворота азимутальной зависимости $I(\theta)$ при перемещении плоскости наблюдения по оси z сохраняется, однако выражен менее явно вследствие различной разности постоянных распространения LP^v_l групп и $LP_{0,1}$ модовой группы. Для различных максимумов $I(\theta)$ имеет место различная скорость их углового перемещения при изменении z . Линейно-поляризованную группу $LP_{0,1}$ в данном примере можно рассматривать как опорную волну. Замена коэффициентов A_l с единичным модулем в выражении (8) на случайные вели-

чины $|A_l|$ не изменяет сущности рассматриваемого эффекта.

Эффект поворота зависимости $I(\theta)$ имеет место при замене $LP_{0,1}$ модовой группы на любую другую LP^v_l группу более высокого порядка. При интерференции большого числа различных $LP_{l,m}$ и $LP^v_{l,m}$ групп смещение максимумов $I(\theta)$ при изменении z также имеет место.

При отсутствии $LP_{0,1}$ модовой группы, т.е. первого слагаемого в формуле (8), в рассмотренном первоначально приближении $\beta_v = \text{const}$, эффект поворота зависимости $I(\theta)$ не наблюдался, а смещение максимумов было случайным.

Количество волноводных мод, которые могут распространяться в волоконном световоде, использованном для экспериментальных исследований, было сравнительно велико — приблизительно 10^6 . Даже если полагать, что при возбуждении высших модовых групп и вихрей, количество интерферирующих линейно-поляризованных групп составляло $1/4$ или менее от возможного общего количества групп, численное моделирование с использованием формулы (8) требует длительных расчётов. Поэтому для изучения характера изменения интерференционной картины, формируемой большим числом высших LP модовых групп и вихрей, количество интерферирующих групп было уменьшено до 500, что соответствовало $V \approx 10^2$, $\lambda = 0,6328$ мкм, $\text{NA} = 0,5$, $a_c \approx 20$ мкм при 25% интерферирующих групп волн от общего возможного количества. Результаты расчёта зависимостей $I(\theta)$ при четырёх значениях перемещения плоскости наблюдения (Δz) приведены на рис. 3. Эффект поворота пятен спеклов, т.е. в данном случае — смещения максимумов зависимостей $I(\theta)$, также имел место, но в ограниченном диапазоне величины Δz и не так явно, как на рис. 1.

Расчёт и численное моделирование пространственных распределений интенсивности при трансформации из ближней зоны дифракции в дальнюю невозможны без учёта радиальных зависимостей LP модовых групп, т.е. в ранее использованном простейшем приближении. Однако существующие сведения о дифракции волноводных мод и оптических вихрей, выходящих из световода, как, например, приводимые в работе [26] или дифракция оптических пучков [2, 18], несущих орбитальный угловой момент, позволяют полагать, что

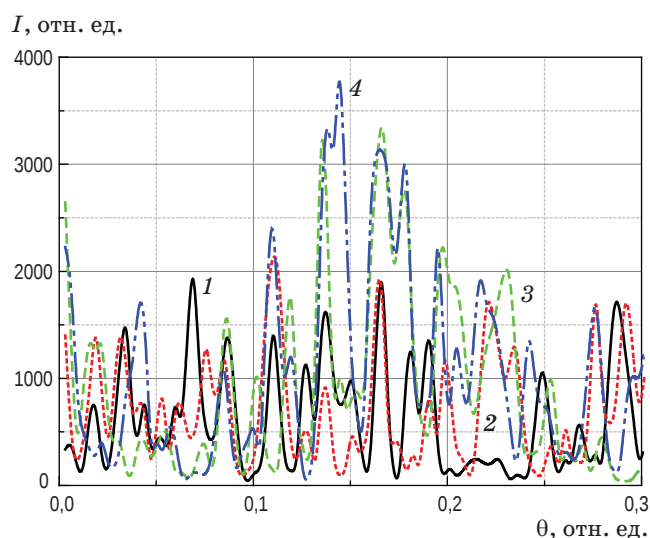


Рис. 3. Расчётное угловое распределение интенсивности при четырёх смещениях плоскости наблюдения Δz : 1 — 0, 2 — 1 мкм, 3 — 2 мкм, 4 — 3 мкм

Fig. 3. Calculated angular intensity distribution at four displacements of the observation plane Δz : 1 — 0, 2 — 1 μm , 3 — 2 μm , 4 — 3 μm

основные закономерности, присущие волнам внутри МВС, в частности, эффект вращения пятен спеклов, сохраняется при трансформации излучения из ближней в дальнюю зону дифракции.

На выходном торце волоконного световода при переходе из сердцевины в свободное пространство имеет место непрерывность тангенциальных составляющих электромагнитного поля. Следовательно, излучение оптического вихря внутри световода запускает оптический вихрь в свободном пространстве. Фазовая скорость распространения излучения в свободном пространстве, в отличие от волоконного световода, не зависит от того, каким типом электромагнитной волны это излучение создано. Поэтому наблюдать изменение интерференционной картины при перемещении плоскости наблюдения в свободном пространстве возможно только в случае, когда выходящие из световода пучки оптического излучения имеют различную угловую расходимость. Наиболее сильно такой эффект наблюдается для волноводных мод высшего порядка, что подтверждается результатами численного моделирования [26] и экспериментального исследования, описанного ниже.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В работах [24, 25] перемещение пятен спеклов выявлялось с использованием функции взаимной корреляции распределений интенсивности выходящего излучения вблизи выходного торца или вблизи фокуса линзы. То есть рассматривались усреднённые по кругу или площади кольца характеристики движения пятен. Это позволило понять общий характер движения пятен, но не позволяло определить траекторию движения пятен и оценить неоднородность скорости и направления движения в различных областях интерференционной картины. Для изучения характера движения пятен при перемещении плоскости наблюдения было проведено следующее экспериментальное исследование.

Возбуждение группы волноводных мод и оптических вихрей осуществлялось сфокусированным наклонным пучком, смещённым относительно оси световода, т.е. преимущественно высокого порядка, аналогично [24, 25]. Исследование было выполнено на МВС со ступенчатым профилем показателя преломления длиной 5 м, с диаметром сердцевины 600 мкм на длине волны 0,6328 мкм. Также, аналогично [24, 25], изображение выходного торца было получено с помощью микрообъектива. Распределения интенсивности были получены с использованием матричной камеры с зарядовой связью (ПЗС), перемещаемой относительно сфокусированного изображения (ближней зоны дифракции) с использованием прецизионной подвижки. Максимальное продольное перемещение ПЗС-камеры составляло 200 мкм. Распределение интенсивности, приводимое ниже на рис. 4, соответствовало промежуточному случаю положения плоскости наблюдения между ближней и дальней зонами дифракции.

Для визуализации перемещения спекл-пятен была использована следующая методика. На изображении спекл-картины отображались только те пикселы изображения, яркость которых была выше некоторого заданного уровня (U_l) — уровня отсечения визуализации. Далее на одно изображение накладывались несколько аналогичных изображений, полученных при последовательном перемещении ПЗС-камеры. Пример полученного распределения интенсивности (в инвертированном виде) для 8-битного чёрно-белого



Рис. 4. Визуализация наложения нескольких распределений интенсивности, полученных при смещении плоскости наблюдения на 200 мкм через 50 мкм при различных уровнях отсечения визуализации U_l : а — 200, б — 50

Fig. 4. Visualization of the superposition of several intensity distributions obtained by shifting the observation plane by 200 μm through 50 μm at different levels of visualization clipping U_l : а — 200, б — 50

изображения при четырёх наложенных изображениях приведен на рис. 4. Изображение, полученное при сравнительно высоком уровне U_l (200 для 8-ми битного изображения), позволяет визуализировать движение пятен спеклов вблизи максимума радиального распределения интенсивности (рис. 4а), а при сравнительно малом (50) — на периферии распределения (рис. 4б). Из полученных изображений, в частности, представленных на рис. 4, следует, что траектория движения пятен в цилиндрических координатах (r_p, θ_p, z_p) приблизительно можно описать как

$$r_p = \text{const}, \quad \theta_p = \theta_0 + \alpha L, \quad z_p = L,$$

где θ_0 — некоторый начальный угол, α — коэффициент пропорциональности, L — величина смещения ПЗС-камеры по оси z . При указанных выше условиях проведения эксперимента, расстояние L , в пределах которого выделяемые на изображениях пятна спеклов существовали, было от 50 мкм до 200 мкм, что фактически является длиной корреляции изображений по параметру L . Угловое перемещение пятен (αL) вблизи максимума радиального распределения интенсивности (рис. 3а)

в указанном диапазоне составляло от 1° до 7° , а на периферии распределения (рис. 3б) — от 5° до 30° .

Более точным выражением, описывающим движение пятен спеклов при перемещении плоскости наблюдения (экспериментально — при перемещении ПЗС-камеры) и следующим из полученных изображений, является:

$$r_p = r_0 + bL, \quad \theta_p = \theta_0 + \alpha L, \quad z_p = L,$$

где r_0 — координата начального положение пятна, b — коэффициент пропорциональности.

Из полученных данных следует, что вблизи максимума радиального распределения интенсивности угол наклона проекции траектории движения пятен (по координатам r_p, θ_p) находился в пределах $\pm 30^\circ$ относительно касательной, а на периферии распределения — преимущественно до $+45^\circ$.

Коэффициент b удобнее определять в относительных единицах по отношению к r_0 . Для рассмотренного примера (рис. 3) на длине корреляции изображений величина b находилась приблизительно в диапазоне $\pm 8^\circ$ вблизи максимума радиального распределения интенсивности и $\pm 15^\circ$ на периферии, величина α от $0,005^\circ/\text{мкм}$ до $0,035^\circ/\text{мкм}$ и приблизительно до $+0,15^\circ/\text{мкм}$ соответственно. То есть, параметры вращения спекл пятен излучения реального многомодового световода при перемещении плоскости наблюдения отличаются в различных областях интерференционной картины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что вращение пятен спеклов при перемещении виртуальной плоскости наблюдения по оси световода обусловлено интерференцией групп волноводных мод и оптических вихрей. Объяснение указанному явлению даёт простейшая физико-математической модель, основанная на суммировании напряжённости полей оптических вихрей с одинаковыми направлениями вращения и одной или нескольких волноводных мод без учёта радиальной зависимости и рассмотрении только азимутальной зависимости результирующего поля как функции продольного смещения вдоль оси световода.

Показано, что эффект вращения пятен спеклов сохраняется при выходе излучения из во-

локонного световода вблизи выходного торца световода, а также вблизи его сфокусированного изображения. Различие параметров движения пятен спеклов в различных областях интерференционной картины зависит от угла выхода излучения из волоконного световода, что предположительно обусловлено интерференцией различных групп электромагнитных волн (оптических вихрей и волноводных мод), а вблизи выбранного угла выхода — связано со статистическим разбросом напряжённости,

фазы и амплитуды волн с близкими постоянными распространения в интерферирующих группах волн.

Полученные результаты работы могут использоваться как для совершенствования методов моделирования и расчёта параметров модового шума при пространственной фильтрации выходящего из многомодового световода когерентного излучения, а также при проектировании волоконно-оптических датчиков, в частности, волоконных спекл-интерферометров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Feng L., Li Y., Wu S., Li W., Qiu J., Hongxiang Guo, Xiaobin Hong, Yong Zuo, Jian Wu. A review of tunable orbital angular momentum modes in fiber: Principle and generation // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. P. 2408. <https://doi.org/10.3390/app9122408>
2. Willner A.E., Pang K., Song H., Zou K., Zhou H. Orbital angular momentum of light for communications // *Appl. Phys. Rev.* 2021. V. 8. P. 041312. <https://doi.org/10.1063/5.0054885>
3. Pang F., Xiang L., Liu H., Zhang L., Wen J., Zeng X., Wang T. Review on fiber-optic vortices and their sensing applications // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. V. 39. № 12. P. 3740–3750. <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-39-12-3740>
4. Волярь А.В., Фадеева Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: I. Структура собственных мод // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22. № 8. С. 57–62.
5. Волярь А.В., Фадеева Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: II. Распространение оптических вихрей // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22. № 8. С. 63–67.
6. Ramachandran S., Kristensen P. Optical vortices in fiber // *Nanophotonics*. 2013. V. 2. № 5–6. P. 455–474. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2013-0047>
7. Zhu J., Yao H., Cheng P., Shi F., Zeng X. Generating vortex Bessel-like beams based on all-fiber mode conversion // *Proc. 2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*. Beijing. China. 2020. P. 1–2. <https://doi.org/10.1364/ACPC.2020.M4A.106>
8. Zhang W., Li X., Zhang L., Huang L., Lu F., Gao F. Generation of cylindrical vector beams and optical vortex in a solid-core ring fiber based on an acoustically induced fiber grating // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2020. V. 26. № 4. P. 4500205. <http://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2906274>
9. Ji K., Lin D., Davidson I.A., Wang S., Carpenter J., Amma Y., Jung Y., Richardson D.J. Generation of high-power picosecond optical vortex beams from a Yb-doped multicore fiber amplifier // *Proc. 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. San Jose. CA. USA. 2022. P. 1–2. https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2022.Ath2C.1
10. Feng J., Zhou J., Xu J., Feng Y., Zeng X. Generating femtosecond vortex beams based on broadband LPFG in Figure-9 mode-locked fiber laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2022. V. 34. № 12. P. 625–628. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2676241>
11. Vikulin D., Barshak E., Lapin B., Enina A., Alexeyev C., Yavorsky M. All-fiber spin-dependent optical

REFERENCES

1. Feng L., Li Y., Wu S., Li W., Qiu J., Hongxiang Guo, Xiaobin Hong, Yong Zuo, Jian Wu. A review of tunable orbital angular momentum modes in fiber: Principle and generation // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. P. 2408. <https://doi.org/10.3390/app9122408>
2. Willner A.E., Pang K., Song H., Zou K., Zhou H. Orbital angular momentum of light for communications // *Appl. Phys. Rev.* 2021. V. 8. P. 041312. <https://doi.org/10.1063/5.0054885>
3. Pang F., Xiang L., Liu H., Zhang L., Wen J., Zeng X., Wang T. Review on fiber-optic vortices and their sensing applications // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. V. 39. № 12. P. 3740–3750. <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-39-12-3740>
4. Volyar A.V., Fadeeva T.A. Vortex nature of optical fiber modes: I. Structure of eigenmodes // *Technical Physics Letters*. 1996. V. 22. № 8. P. 57–62.
5. Volyar A.V., Fadeeva T.A. Vortex nature of optical fiber modes: II. Propagation of optical vortices // *Technical Physics Letters*. 1996. V. 22. № 8. P. 63–67.
6. Ramachandran S., Kristensen P. Optical vortices in fiber // *Nanophotonics*. 2013. V. 2. № 5–6. P. 455–474. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2013-0047>
7. Zhu J., Yao H., Cheng P., Shi F., Zeng X. Generating vortex Bessel-like beams based on all-fiber mode conversion // *Proc. 2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*. Beijing. China. 2020. P. 1–2. <https://doi.org/10.1364/ACPC.2020.M4A.106>
8. Zhang W., Li X., Zhang L., Huang L., Lu F., Gao F. Generation of cylindrical vector beams and optical vortex in a solid-core ring fiber based on an acoustically induced fiber grating // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2020. V. 26. № 4. P. 4500205. <http://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2906274>
9. Ji K., Lin D., Davidson I.A., Wang S., Carpenter J., Amma Y., Jung Y., Richardson D.J. Generation of high-power picosecond optical vortex beams from a Yb-doped multicore fiber amplifier // *Proc. 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. San Jose. CA. USA. 2022. P. 1–2. https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2022.Ath2C.1
10. Feng J., Zhou J., Xu J., Feng Y., Zeng X. Generating femtosecond vortex beams based on broadband LPFG in Figure-9 mode-locked fiber laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2022. V. 34. № 12. P. 625–628. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2676241>
11. Vikulin D., Barshak E., Lapin B., Enina A., Alexeyev C., Yavorsky M. All-fiber spin-dependent optical

- vortex generation via flexural acoustic wave // Proc. 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara. Russian Federation. 2021. P. 1–4. <http://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649221>
12. Wu H., Xu J., Wang L., Teng L., Lv S., Pang F., Zeng X. Mode-locked vortex fiber laser based on high-order mode conversion // Proc. 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN). Xi'an. China. 2021. P. 613–616. <http://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3077571>
 13. Dong Z., Sun H., Zhang Y., Zou J., Xu L., Luo Z. Visible-wavelength-tunable, vortex-beam fiber laser based on a long-period fiber grating // IEEE Photonics Technology Letters. 2021. V. 33. № 21. P. 1173–1176. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3111191>
 14. Pryamikov A.D., Alagashev G.K. Vortex supported waveguiding in microstructured optical fibers // Proc. 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bari. Italy. 2020. P. 1–3. <http://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203377>
 15. Yue Y., Geng W. Beyond octave-spanning supercontinuum generation of optical vortices in ring-core photonic crystal fiber // Proc. 30th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). Taipei. Taiwan. 2021. P. 195–196. <https://doi.org/10.1109/WOCC53213.2021.9602996>
 16. Alexeyev C.N., Barshak E.V., Lapin B.P., Vikulin D., Yavorsky M. Propagation of optical vortices in fiber ring resonators // Proc. 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara. Russian Federation. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649388>
 17. Alexeyev C., Barshak E., Vikulin D., Lapin B., Yavorsky M. Propagation of optical vortices in the system of twisted anisotropic and multihelical optical fibers // 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara. Russian Federation. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649337>
 18. Wang J., Liu J., Li S., Yifan Z., Jing D., Zhu L. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications // Nanophotonics. 2022. V. 11. № 4. P. 645–680. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0527>
 19. Kovalev A.A., Kotlyar V.V., Porfirev A.P. Orbital angular momentum and topological charge of a multi-vortex Gaussian beam // Journal of the Optical Society of America A. 2020. V. 37. № 11. P. 1740–1747. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.401561>
 20. Kotlyar V.V., Kovalev A.A. Optical vortex beams with a symmetric and almost symmetric OAM spectrum // Journal of the Optical Society of America A. 2021. V. 38. P. 1276–1283. <https://doi.org/10.1364/josaa.432623>
 21. Kovalev A.A., Kotlyar V.V. Orbital angular momentum of superpositions of optical vortices perturbed by a sector aperture // Photonics. 2022. V. 9. № 531. <https://doi.org/10.3390/photonics9080531>
 22. Kotlyar V., Kovalev A., Nalimov A., Kozlova E. Preservation of optical vortex OAM after distortion by a diaphragm // Proc. 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). St. Petersburg. Russian Federation. 2022. P. 305–309. <https://doi.org/10.1109/EEExPolytech56308.2022.9950990>
 23. Кизеветтер Д.В. Влияние дефектов торцевых поверхностей световода на параметры модового шума при vortex generation via flexural acoustic wave // Proc. 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara. Russian Federation. 2021. P. 1–4. <http://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649221>
 12. Wu H., Xu J., Wang L., Teng L., Lv S., Pang F., Zeng X. Mode-locked vortex fiber laser based on high-order mode conversion // Proc. 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN). Xi'an. China. 2021. P. 613–616. <http://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3077571>
 13. Dong Z., Sun H., Zhang Y., Zou J., Xu L., Luo Z. Visible-wavelength-tunable, vortex-beam fiber laser based on a long-period fiber grating // IEEE Photonics Technology Letters. 2021. V. 33. № 21. P. 1173–1176. <https://doi.org/10.1109/LPT.2021.3111191>
 14. Pryamikov A.D., Alagashev G.K. Vortex supported waveguiding in microstructured optical fibers // Proc. 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bari. Italy. 2020. P. 1–3. <http://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203377>
 15. Yue Y., Geng W. Beyond octave-spanning supercontinuum generation of optical vortices in ring-core photonic crystal fiber // Proc. 30th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). Taipei. Taiwan. 2021. P. 195–196. <https://doi.org/10.1109/WOCC53213.2021.9602996>
 16. Alexeyev C.N., Barshak E.V., Lapin B.P., Vikulin D., Yavorsky M. Propagation of optical vortices in fiber ring resonators // Proc. 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara. Russian Federation. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649388>
 17. Alexeyev C., Barshak E., Vikulin D., Lapin B., Yavorsky M. Propagation of optical vortices in the system of twisted anisotropic and multihelical optical fibers // 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara. Russian Federation. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649337>
 18. Wang J., Liu J., Li S., Yifan Z., Jing D., Zhu L. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications // Nanophotonics. 2022. V. 11. № 4. P. 645–680. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0527>
 19. Kovalev A.A., Kotlyar V.V., Porfirev A.P. Orbital angular momentum and topological charge of a multi-vortex Gaussian beam // Journal of the Optical Society of America A. 2020. V. 37. № 11. P. 1740–1747. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.401561>
 20. Kotlyar V.V., Kovalev A.A. Optical vortex beams with a symmetric and almost symmetric OAM spectrum // Journal of the Optical Society of America A. 2021. V. 38. P. 1276–1283. <https://doi.org/10.1364/josaa.432623>
 21. Kovalev A.A., Kotlyar V.V. Orbital angular momentum of superpositions of optical vortices perturbed by a sector aperture // Photonics. 2022. V. 9. № 531. <https://doi.org/10.3390/photonics9080531>
 22. Kotlyar V., Kovalev A., Nalimov A., Kozlova E. Preservation of optical vortex OAM after distortion by a diaphragm // Proc. 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). St. Petersburg. Russian Federation. 2022. P. 305–309. <https://doi.org/10.1109/EEExPolytech56308.2022.9950990>
 23. Kizevetter D.V. How defects of the end surfaces of a lightguide affect the mode-interference parameters

- наличии оптических вихрей // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 1. С. 10–16.
24. Кизеветтер Д.В., Малюгин В.И., Ильин Н.В., Чангсен Сан. Исследование спекл-структур, сформированных оптическими вихрями волоконных световодов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 3. С. 60–64.
 25. Ильин Н.В., Кизеветтер Д.В. Метод возбуждения оптических вихрей в градиентных волоконных световодах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2010. Т. 2(98). С. 96–102.
 26. Ильин Н.В., Кизеветтер Д.В. Численное моделирование распределения интенсивности света вблизи выходного торца волоконного световода при наличии оптических вихрей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. Т. 1(165). С. 108–113.

АВТОРЫ

Дмитрий Владимирович Кизеветтер — доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7005894843; <https://orcid.org/0000-0002-5152-4352>; dmitrykiesewetter@gmail.com

Никита Владимирович Ильин — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57215214775; <https://orcid.org/0009-0002-5717-3570>; nvilyn@gmail.com

Статья поступила в редакцию 09.01.2024
Одобрена после рецензирования 28.02.2024
Принята к печати 28.06.2024

- when optical vortices are present // Journal of Optical Technology. 2013. V. 80. № 1. P. 7–11. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000007>
24. Kizevetter D. V., Iljin N. V., Malyugin V. I., Changsen Sun. Investigation of speckle structures formed by the optical vortices of fiber lightguides // Journal of Optical Technology. 2015. V. 82. № 3. P. 174–177. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000174>
 25. Il'in N.V., Kiesewetter D.V. Method of optical vortices excitation in graded index optical fibers // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2010. V. 2(98). P. 96–102.
 26. Kiesewetter D.V., Ilyin N.V. The intensity distribution of the light near the output end of the optical fiber in the presence of optical vortices // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2013. V. 1(165). P. 108–113.

AUTHORS

Dmitry V. Kiesewetter — Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Full Professor of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, 195251, Russia; Scopus ID: 7005894843; <https://orcid.org/0000-0002-5152-4352>; dmitrykiesewetter@gmail.com

Nikita V. Ilyin — Post Graduate Student of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Saint Petersburg, Russia; Scopus ID: 57215214775; <https://orcid.org/0009-0002-5717-3570>; nvilyn@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 09.01.2024
Approved after review 28.02.2024
Accepted for publication 28.06.2024