

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ МИКРОКОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ

Л. И. БАКИРОВА¹, Г. С. ВОРОНКОВ²

¹ bakirova.li@ugatu.su, ² voronkov.gs@ugatu.su

^{1,2} ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В этой статье мы предлагаем оценить возможность применения нового метода для определения показателя преломления и турбулентных свойств жидкостей с помощью оптических пучков, переносящих орбитальный угловой момент (вихревых пучков), на основе фотонных интегральных схем (ФИС). Суть метода заключается в измерении показателя преломления и детектирования порядка вихря одновременно. Данная сенсорная система будет выполнена с помощью двух микрокольцевых резонаторов (МКР). Этот метод позволит повысить точность измерений, а также измерять завихрение в жидкости.

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, датчик, фотонная интегральная схема, показатель преломления, микрокольцевой резонатор.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы световые пучки, переносящие орбитальный угловой момент, широко используются во многих областях благодаря своим уникальным характеристикам. Такие оптические пучки описываются спиральным фазовым фронтом, то есть их поперечное распределение электрического поля содержит множитель $e^{i\ell\phi}$, где ϕ – азимутальная координата и ℓ – топологический заряд, который определяет переносимый электромагнитной волной ОУМ и может принимать любое целочисленное значение. Благодаря наличию этого множителя фазовый фронт такой волны имеет спиральную форму, при этом в поперечном сечении волны фаза претерпевает ℓ раз изменение от 0 до 2π . Таким образом, вихревые пучки представляют собой собственные функции оператора углового момента и переносят ОУМ, пропорциональный ℓ [1, 2].

Оптические вихри находят применение в таких областях, как микроперемещения («оптический пинцет»), визуализация, микроскопия, измерительная техника, квантовая обработка информации и так далее [3-6].

Особый интерес представляют датчики на основе оптических вихревых пучков, которые имеют ряд преимуществ перед традиционными датчиками [7-9]. Принцип измерений заключается либо в анализе изменения порядка вихря, либо в интерференции оптического вихревого пучка с гауссовским пучком для обнаружения разности фаз. Благодаря таким возможностям ОУМ-пучки можно использовать для разработки высокоэффективных датчиков. Но реализация сенсорных систем требует громоздких оптических компонентов, которые не совсем подходят для практического применения. Решением этой проблемы могут стать фотонные интегральные схемы, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с электронными аналогами [10, 11].

ФИС изготавливаются на различных технологических платформах. Наиболее распространены в области сенсорики платформы «кремний-на-изоляторе» (SOI, silicon-on-insulator) и нитрид кремния (SiN). Сенсоры на основе нитрида кремния способны обеспечивать прозрачность для длин волн в видимом и ближайшем инфракрасном диапазоне. Кремний в качестве подложки отличается превосходной механической прочностью, химической и термической стабильностью, низкой стоимостью [12].

ОБЗОР СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОУМ-ПУЧКОВ

Принцип работы измерительных систем на основе детектирования вихревых пучков заключается в изменении параметров вихря при воздействии температуры на объект [13–15]. Так, авторы статьи [13] показали возможность улучшения характеристик волоконной брэгговской решетки (ВБР) для детектирования температуры. В отличие от обычного датчика температуры на основе ВБР, где используется метод опроса по длине волны, в датчике температуры на основе вихревого пучка и гауссовского луча, температура измеряется путем анализа изменения разности фаз двух лучей, проходящих по разным путям в этой системе.

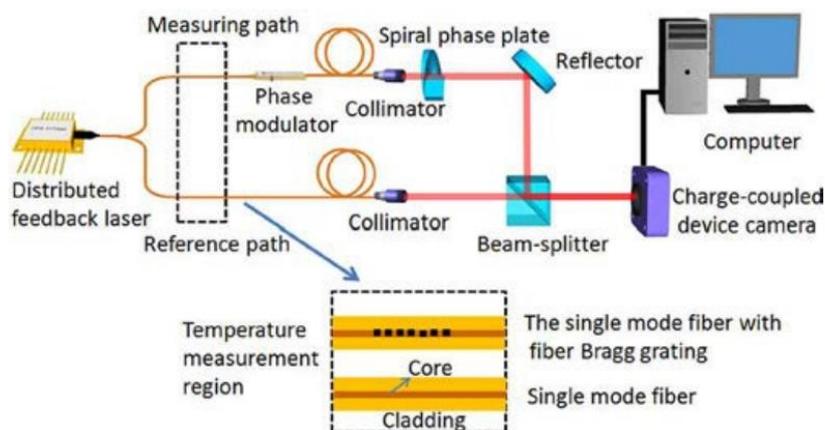


Рис. 1. Схема измерения температуры с использованием вихревого пучка и гауссовского луча [13]

Принцип работы заключается в том, что разность фаз между двумя пучками определяет угол поворота интерференционной картины. Это может быть зафиксировано камерой в режиме реального времени. Все изображения анализируются компьютером, и температура рассчитывается в соответствии с углом поворота интерференционной картины.

Чувствительность данного метода составила $26^{\circ}/^{\circ}\text{C}$. По аналогичному принципу авторы статьи [15] реализовали датчик температуры на ВБР с высоким разрешением и большим диапазоном. Результаты моделирования показали, что при диапазоне температур 27°C - 427°C чувствительность этого датчика составляет $14,42 \text{ пм}/^{\circ}\text{C}$.

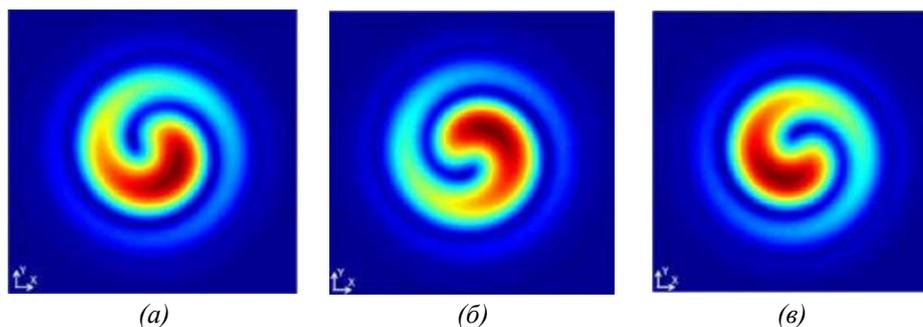


Рис. 2. Интерференционная картина двух световых путей
а) – при 0°C ; б) – при 45°C ; в) – при 90°C [15]

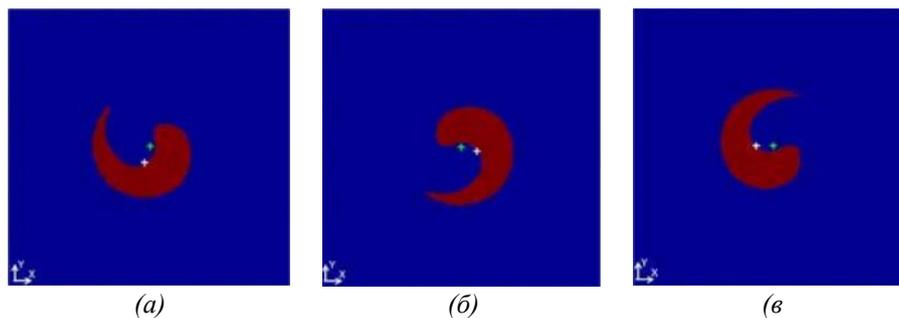


Рис. 3. Интерференционная картина после обработки изображения
a) – при 0 °С; б) – при 45 °С; в) – при 90°С [15]

Следующий параметр, который можно измерить с помощью ОУМ – это завихренность, которая является одной из наиболее важных динамических переменных потока. В работе [16] было продемонстрировано вращение твердого тела, где завихренность потока точно известна. Очень маленькие частицы отслеживают поток жидкости, и в стационарном состоянии они движутся с локальной скоростью потока и вращаются с локальной угловой скоростью жидкости. В поле потока твердого тела угловая скорость вращения постоянна, а частицы, переносимые потоком, также вращаются вокруг своего центра, как если бы они были частью твердого тела. Подход имеет большие перспективы для анализа нестационарных течений с пространственно-изменяющимся полем завихренности.

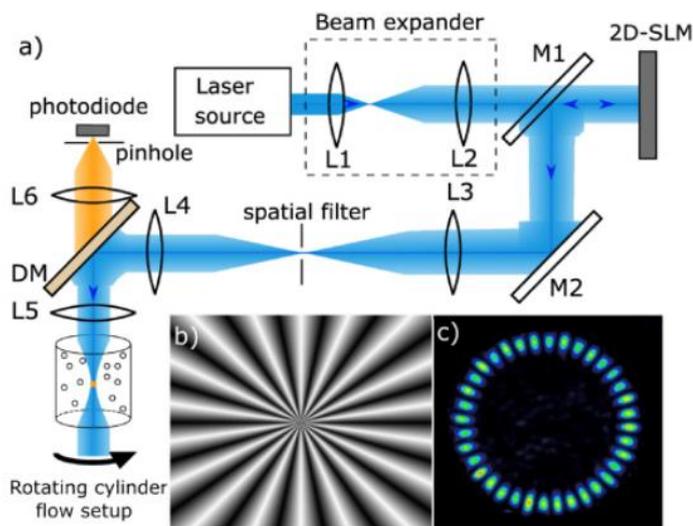


Рис. 4. Измерения угловой скорости и завихренности локального потока:
(a) – экспериментальная установка; (б) – дифракционная картина, генерирующая моды $LG \pm 18$;
(с) – результирующая структура луча, используемая для освещения частиц в потоке жидкости [16]

Также ОУМ можно использовать для комплексного спектрального анализа с целью извлечения данных о форме объекта из спектра интенсивности, а также для определения его позиции в пространстве с помощью фазового спектра [17]. В данном случае рассмотрен цилиндрический объект с вырезанным сектором (рис. 5), и найдена зависимость спектра интенсивности от угла кругового сектора и зависимость фазового спектра от ориентации объекта в пространстве.

Подход основан на том, что усечение зондирующего луча приводит к изменению его ОУМ-спектра, поэтому вырез в объекте может быть впоследствии обнаружен. Также комплексный

ОУМ-спектр пучка образует пару преобразований Фурье с соответствующим пространственным распределением в азимутальном направлении, и если в этом направлении находится вырез, то в спектре интенсивности появляется функция вида sinc.

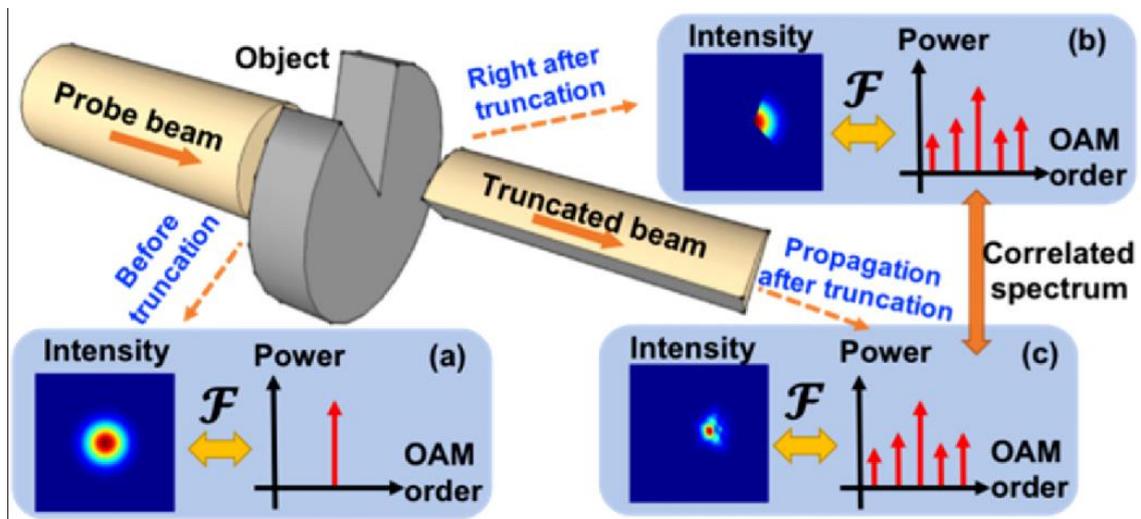


Рис. 5. Принцип использования ОУМ-спектра для определения параметров объекта: а – распределение интенсивности пучка и ОУМ-спектр перед взаимодействием с объектом; б – распределение интенсивности пучка и ОУМ-спектр сразу после взаимодействия с объектом; в – распределение интенсивности пучка и ОУМ-спектр на некотором расстоянии после взаимодействия с объектом [17]

Такие волоконно-оптические системы на основе вихревых пучков демонстрируют замечательные характеристики и способны работать в самых суровых условиях, при этом обладая высокой надежностью и живучестью [18]. Как показано на рис. 2, такие датчики имеют широкий спектр применения в промышленности, включая мониторинг нефте- и газопроводов, мониторинг состояния платин, зданий, мостов, аэрокосмических испытательных установок, научных исследованиях об окружающей среде, а также предупреждения о пожарах и землетрясениях.

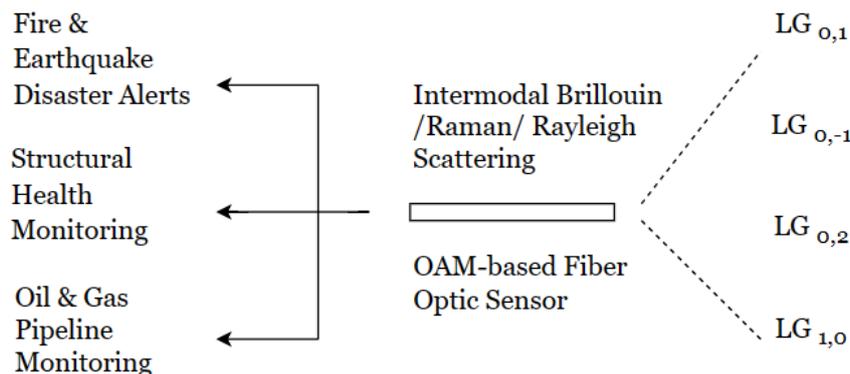


Рис. 6. Схема оптоволоконных датчиков на основе оптических пучков для промышленных применений [18]

В этой главе рассмотрена малая часть сенсорных систем – датчики температуры, измерения завихренности и определения параметров объекта. Но исследование в этой области намного шире – измерение угловой скорости [19], определение турбулентности ветра [20], обнаружение объектов в мутной воде [21]. Во всех этих приложениях есть потребность миниатюризации и повышения плотности интеграции устройств [22]. В связи с этим есть актуальная задача создания сенсоров, основанных на ОУМ-пучках, на основе фотонных интегральных схем.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОУМ

Показатель преломления (ПП) оптической среды является важной характеристикой, описывающей взаимодействие света с веществом. Существуют множество методов для точного измерения концентрации веществ и ПП [23, 24]. Реализации этих методов являются сложными в процессе изготовления и имеют дорогие компоненты. За последние десять лет было опубликовано множество работ по определению ПП с помощью вихревых пучков [25–28], где представлены результаты на этапе численного моделирования, экспериментальной верификации не проводилось. Мы предлагаем рассмотреть концепцию сенсорной системы, использующей в качестве измерительных сигналов одновременно ПП и орбитальный угловой момент.

Сенсорная система состоит из двух микрокольцевых резонаторов (МКР). Первый МКР выполняет две задачи одновременно: измерение ПП и генерация вихревого пучка, распространяющегося перпендикулярно плоскости ФИС. Второй МКР детектирует изменение параметров вихревого пучка. Таким образом, измерение показателя преломления в системе происходит двумя способами, что позволяет повысить точность измерений. С другой стороны, такая сенсорная система может позволить регистрировать не только ПП среды, но и турбулентности в ней, поскольку они влияют на параметры принятого вихревого пучка. Благодаря показаниям рефрактометрического датчика можно «очистить» показания второго МКР от флуктуаций, вызванных изменением ПП, что повысит точность определения турбулентности потока жидкости.



Рис. 7. Эскиз сенсорной системы с использованием вихревого пучка для определения показателя преломления

Измерение рефракции происходит двумя способами – по изменению показателя преломления и по изменению порядка вихря. Дополнительно, с помощью этого метода можно измерять завихрение в жидкости. Зная, как изменялся коэффициент рефракции, очищать результаты измерения турбулентности в жидкости.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для генерации вихревого пучка с помощью ФИС в работе [29] представлены возможные варианты решений: out-of-plane и in-plane. В эскизе сенсорной системы, представленной на рис. 7, в качестве излучателя вихревого пучка предполагается использовать конструкцию перестраиваемого по длине волны излучателя на основе платформы кремний-на-изоляторе. В работе [30] было предложено использование кольцевого резонатора, в который встроены р-п диод с обратным смещением. Использование р-п перехода с обратным смещением позволило авторам обеспечить более энергоэффективное и быстрое переключение. В качестве опроса датчика в нашей сенсорной системе предлагается использование схемы опроса на основе МКР

с меньшей добротностью. Такая схема была представлена в работе [31], где авторы использовали МКР для конструкции рефрактометрической сенсорной системы для анализа жидкостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно заключить, что применение вихревых пучков в сенсорных системах на основе интегральной фотоники имеет большой потенциал. Представленная сенсорная система на основе двух МКР позволяет не только повысить точность измерений, но и реагировать на турбулентность среды. Дальнейшее развитие этого подхода требует численного моделирования и экспериментальной верификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen L. et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // *Phys. Rev. A*. 1992. Vol. 45. № 11.
2. Khonina S. N. et al. An analysis of the angular momentum of a light field in terms of angular harmonics // *J. Mod. Opt.* 2001. Vol. 48. № 10.
3. Dholakia K., Čižmár T. Shaping the future of manipulation // *Nature photonics*. 2011. Т. 5. №. 6. С. 335–342.
4. Padgett M., Bowman R. Tweezers with a twist // *Nature photonics*. 2011. Т. 5. №. 6. С. 343–348.
5. Dennis M. R. et al. Isolated optical vortex knots // *Nature Physics*. 2010. Т. 6. №. 2. С. 118–121.
6. Bernet S. et al. Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy // *Opt. Express*. 2006. Т. 14. №. 9. С. 3792–3805.
7. Datta A., Saha A. Realization of a highly sensitive multimode interference effect-based fiber-optic temperature sensor by radiating with a Vortex beam // *Optik*. 2020. Т. 218. С. 165006.
8. Lavery M. P. J. et al. Observation of the rotational Doppler shift of a white-light, orbital-angular-momentum-carrying beam backscattered from a rotating body // *Optica*. 2014. Т. 1. №. 1. С. 1–4.
9. Yao A. M., Padgett M. J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // *Advances in optics and photonics*. 2011. Т. 3. №. 2. С. 161–204.
10. Subbaraman, Harish, et al. Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects // *Optics express* 23.3 (2015): 2487-2511.
11. Fatkhiev, Denis M., et al. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams—a review // *Sensors*. 21.15 (2021): 4988.
12. Lin H. et al. Mid-infrared integrated photonics on silicon: a perspective // *Nanophotonics*. 2018. Т. 7. №. 2. С. 393–420.
13. Qiu L. Q. et al. Fiber optic temperature sensor using the orbital angular momentum and gaussian beams // *Instrumentation Science & Technology*. 2017. Т. 45. №. 2. С. 123–136.
14. Datta A., Saha A. Realization of a highly sensitive multimode interference effect-based fiber-optic temperature sensor by radiating with a Vortex beam // *Optik*. 2020. Т. 218. С. 165006.
15. Fu H. et al. A high resolution and large range fiber Bragg grating temperature sensor with vortex beams // *Optical Fiber Technology*. 2020. Т. 60. С. 102369.
16. Ryabtsev A. et al. Fluid flow vorticity measurement using laser beams with orbital angular momentum // *Optics express*. 2016. Т. 24. №. 11. С. 11762–11767.
17. Xie G. et al. Using a complex optical orbital-angular-momentum spectrum to measure object parameters // *Opt. Lett.* 2017. Vol. 42. № 21.
18. Weng Y., Pan Z. Orbital Angular Momentum Based Sensing and Their Applications: A Review // *Journal of Lightwave Technology*. 2022.
19. Du J. et al. Single-pixel identification of 2-dimensional objects by using complex Laguerre–Gaussian spectrum containing both azimuthal and radial modal indices // *Optics Communications*. 2021. Т. 481. С. 126557.
20. Weng Y., Pan Z. Orbital Angular Momentum Based Sensing and Their Applications: A Review // *Journal of Lightwave Technology*. 2022.
21. Jantzi A. et al. Enhanced underwater ranging using an optical vortex // *Optics express*. 2018. Т. 26. №. 3. С. 2668–2674.
22. Kim I. et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology // *Nature nanotechnology*. 2021. Т. 16. №. 5. С. 508–524.
23. Zhang W. et al. Highly sensitive refractive index sensing by fast detuning the critical coupling condition of slot waveguide ring resonators // *Optics letters*. 2016. Т. 41. №. 3. С. 532–535.
24. Gong X., Ngai T., Wu C. A portable, stable and precise laser differential refractometer // *Review of Scientific Instruments*. 2013. Т. 84. №. 11. С. 114103.
25. Datta A., Chaturvedi M. Investigation of a highly sensitive vortex beam-shined optical sensor for the detection of glucose concentration in urine // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. Т. 1091. №. 1. С. 012017.
26. Datta A., Saha A. Investigation of an ultra-sensitive fiber-optic fuel adulteration sensor by propagating a higher-order Bessel-Gauss beam // *Optik*. 2021. Т. 243. С. 167408.

27. Kerschbaumer N. M. et al. Twisted light Michelson interferometer for high precision refractive index measurements //Optics Express. 2022. Т. 30. №. 16. С. 29722-29734.
28. Na Y., Ko D. K. High-resolution refractometry using phase shifting interferometry based on spatial light modulator and vortex probe //Optics & Laser Technology. 2019. Т. 112. С. 479-484.
29. Fatkhiev D. M. et al. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams—a re-view //Sensors. 2021. Т. 21. №. 15. С. 4988.
30. Stepanov I. V. et al. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with pn depletion diode //Sensors. 2022. Т. 22. №. 3. С. 929.
31. Voronkov G. et al. Design and Modeling of a Fully Integrated Microring-Based Photonic Sensing System for Liquid Refractometry //Sensors. 2022. Т. 22. №. 23. С. 9553.

ОБ АВТОРАХ

БАКИРОВА Ляйсан Ильшатовна, асп. каф. ТС. Дипл. Инженера (УГАТУ, 2020).

ВОРОНКОВ Григорий Сергеевич, доцент каф. ТС. Дипл. инженер (УГАТУ, 2007). Кандидат техн. наук в телекоммуникационных системах, сетях и устройствах (УГАТУ, 2017). Иссл. в лаборатории «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

METADATA

Title: Prospects for micro-ring resonator-based sensors using optical vortex beams.

Authors: L.I. Bakirova¹, G.S. Voronkov²

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ bakirova.li@ugatu.su, ² voronkov.gs@ugatu.su.

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (28), pp. 35-41, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: In this paper, we propose to evaluate the possibility of applying a new method for determining the refractive index and turbulent properties of liquids using optical beams carrying orbital angular momentum (vortex beams) based on photonic integrated circuits (PIC). The essence of the method is to measure the refractive index and detect the vortex order simultaneously. This sensor system will be made using two micro-ring resonators (MR). This method will make it possible to increase the accuracy of measurements, as well as to measure the vortex in the liquid.

Key words: orbital angular momentum; sensor; photonic integrated circuit; refractive index; micro-ring resonator.

About authors:

BAKIROVA Liaisan Il'shatovna, Postgrad. (PhD) Student, Dipl. engineer (USATU, 2020). Dept. of Telecommunication Systems (UUST)

VORONKOV, Grigory Sergeevich, ass. Prof. of the Dept. of Telecommunication Systems (UUST). Dipl. engineer (USATU, 2007). Cand. of Tech. Sc. in telecom. systems, networks and devices (USATU, 2017), research laboratory "Sensor systems based on integrated photonics devices"