

УДК 621.372.8

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ**Рябцев В.Н., Гончаренко И.А., Ильюшенок А.В.**

Предложены конструкции и принципы функционирования датчиков для измерения величины и направления деформаций измеряемых объектов и определения напряженности электрического поля. Векторный датчик на основе волоконных интерферометров позволяет измерять величину и направление деформаций и смещений измеряемых объектов. Диапазон измерения достигает 5 мм, точность определяется шагом перемещения сканирующего зеркала и на используемой элементной базе составила 10 мкм. Датчик на основе микрокольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов, заполненных ЖК, позволяет измерять напряженность электрических полей в диапазоне от 10 до 3×10^6 В/м с точностью до 1 В/м. Быстродействие датчика ограничено временем отклика ЖК и варьируется от десятков до сотен микросекунд, что позволяет измерять с его помощью переменные электрические поля с частотами до десятков кГц.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометр Майкельсона, деформация, щелевой волновод, жидкий кристалл, кольцевой резонатор, напряженность электрического поля.

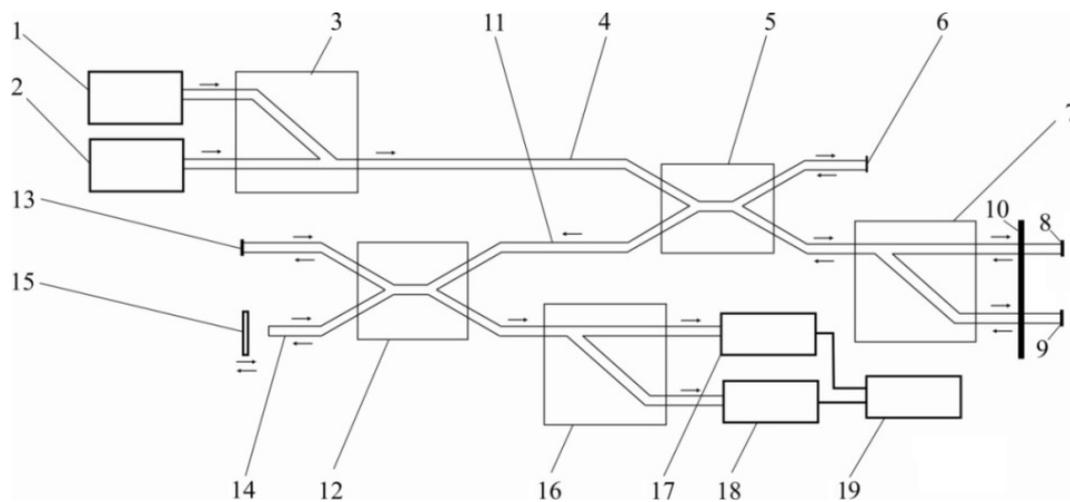
(Поступила в редакцию 11 февраля 2019 г.)

Введение. Оптические волноводные структуры представляют собой перспективные и потенциально привлекательные инструменты для создания информационно-измерительных систем различного назначения. В волоконно-оптических системах измеряемый параметр преобразуется в оптический сигнал, передающийся по оптоволокну. Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие физические параметры, например: давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебание, массу, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, электрическое поле, электрический ток, магнитное поле, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т. д.

Датчики на основе оптических волокон имеют значительные преимущества перед традиционными устройствами [1, 2]. Они отличаются высокой механической прочностью, стойкостью к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды, отсутствием электромагнитных помех, химической инертностью, позволяют выполнять бесконтактные и дистанционные измерения. Кроме того, волоконно-оптические датчики могут использоваться во взрыво- и пожароопасных условиях, при затрудненном доступе для обследования.

Наибольшую точность измерений можно получить при использовании интерферометрических схем [3, 4]. В данной работе рассмотрены структурные схемы и принципы функционирования датчиков на основе волоконно-оптических интерферометров, позволяющих измерять величину и направление смещения (деформаций) контролируемых объектов, а также напряженности внешних электрических полей.

Датчик деформаций. Структурная схема датчика представлена на рисунке 1. Основу датчика составляют два волоконных интерферометра Майкельсона. Вход первого интерферометра соединен с источником оптического излучения. Оптический сигнал делится в разветвителе и поступает на два отрезка волокна. Эти волокна служат плечами интерферометра. Одно плечо интерферометра далее разделяется на два волокна. Эти волокна (измерительные) жестко связаны с контролируемым объектом и следуют всем его деформациям. Второе плечо представляет собой опорное волокно, которое расположено свободно и не подвергается деформациям. Для усиления отражения на торцы волокон нанесено отражающее покрытие. Отраженные от торцов оптические сигналы поступают на разветвитель, где интерферируют. Интерференционный сигнал на выходе интерферометра зависит от разности оптических длин плеч.



1, 2 – источник излучения λ_1 и λ_2 ; 3 – Y-образный волоконно-оптический разветвитель; 4, 11 – подводящее оптическое волокно; 5, 12 – X-образный волоконно-оптический разветвитель; 6 – опорное оптическое волокно; 7, 16 – Y-образный волоконно-оптический разветвитель с разделением по длинам волн; 8, 9 – измерительное оптическое волокно; 10 – соединительный стержень; 13, 14 – эталонное оптическое волокно; 15 – регулируемая линия задержки; 17, 18 – фотодетектор; 19 – блок обработки сигналов

Рисунок 1. – Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгибов

Деформация объекта и связанных с ним измерительных волокон приводит к изменению разности плеч интерферометра и, соответственно, к смещению интерференционной картины. Это смещение является относительным, и для отслеживания деформации волокна необходимо непрерывно производить измерения. Для измерения абсолютной деформации используется второй интерферометр, на вход которого поступает суммарный сигнал на двух длинах волн с выхода первого интерферометра.

Разность оптических длин плеч второго интерферометра можно регулировать с помощью линии задержки. Огибающая интерференционной картины на выходе второго интерферометра представляет собой три пика когерентности на двух длинах волн (рис. 2). Центральный пик образуется при равновесии двух плеч второго интерферометра Майкельсона, т. е. при отсутствии разности оптического пути. Боковые пики возникают при соответствии разности оптических длин плеч второго интерферометра оптической разности хода в первом интерферометре. Таким образом, разность между положением центрального и одним из боковых пиков соответствует разности плеч первого интерферометра. Растяжение одного из измерительных волокон приводит к дополнительному набегу фаз оптического сигнала в нем и, следовательно, к смещению боковых пиков. Смещение пика прямо пропорционально величине воздействия на измерительное волокно. Таким образом, величину деформации контролируемого объекта можно определить по смещению боковых пиков относительно их положения в исходном состоянии.

Два измерительных волокна необходимы для определения направления деформации. При этом в каждое из измерительных волокон подается сигнал на определенной длине волны. Оба измерительных волокна связаны жестким стержнем друг с другом и измеряемым объектом. Изгиб объекта в одном или противоположном направлении приводит к растяжению одного из измерительных волокон. В результате дополнительный набег фаз возникает именно в этом волокне, что дает смещение боковых пиков интерференционной картины на соответствующей длине волны (рис. 2а, б). Следовательно, сравнивая относительное смещение боковых пиков на разных длинах волн по отношению к исходному состоянию, можно определить направление деформации контролируемого объекта в плоскости его смещения.

На основе предложенного метода была разработана лабораторная установка интерферометрического датчика и проведено его экспериментальное исследование.

Для генерации стабилизированного излучения использовался источник оптического излучения ОТ-2-7/ИИ на базе высокостабильных лазерных светодиодов, излучающих на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм (нестабильность уровня мощности излучения за 15 мин не более $\pm 0,03$ дБ). Полуширина спектра излучения светодиодов составляла 10 нм. На выходные торцы измерительных и эталонного оптических волокон нанесено зеркальное диэлектрическое покрытие, что позволяет исключить фазовые искажения интерфери-

рующих световых волн. Регулируемая линия задержки представляет собой подвижное зеркало на механическом приводе и смонтирована на воздушной подушке для того, чтобы исключить влияние вибрационных помех на результаты измерений и нарушения юстировки. Зеркало представляет собой многослойную диэлектрическую структуру из периодических слоев с большими и меньшими показателями преломления. Толщина слоев подобрана таким образом, чтобы получить максимум коэффициента отражения для используемых длин волн. Для регистрации выходных сигналов с высокой точностью применялись измерители оптической мощности ОТ-2-7/ИМ (на основе фотодиода InGaAs с размером фоточувствительной площадки 1 мм, погрешность измерения оптической мощности $\pm 0,22$ дБ). Обработка и визуализация сигналов производилась с помощью персонального компьютера.

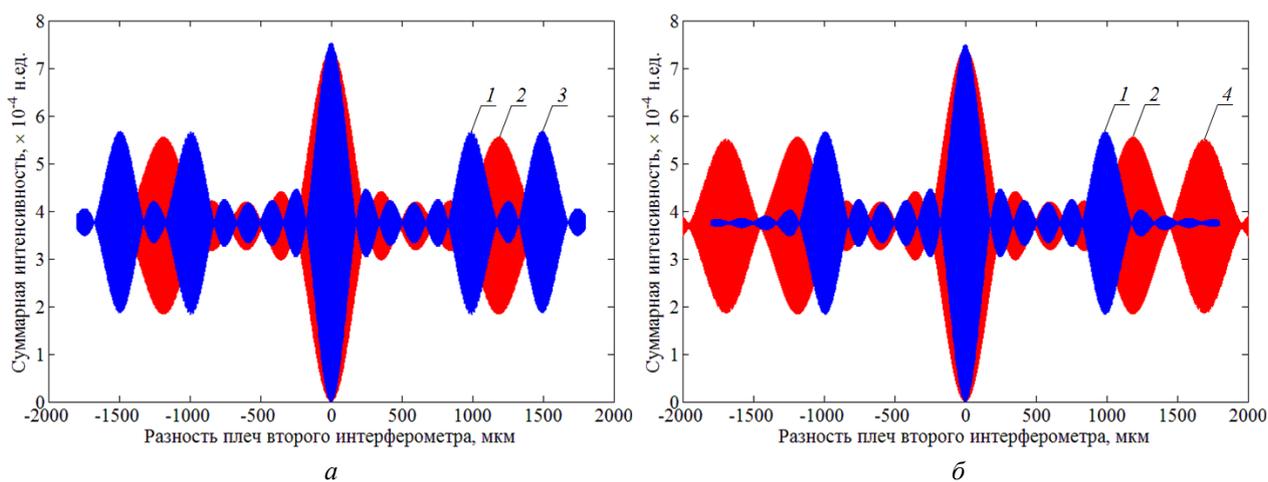


Рисунок 2. – Интерференционная картина на выходе второго интерферометра на длинах волн 1,31 (кривые 1, 3) и 1,55 (2, 4) мкм при выпуклой (а) и вогнутой (б) деформации контролируемого объекта. Кривые 1 и 2 описывают интерференционную картину в исходном состоянии интерферометра, 3 и 4 – при деформации контролируемого объекта

При выпуклой деформации контролируемого объекта растяжению подвергается волокно, расположенное ближе к нему, что выражается в смещении боковых пиков интерференционной картины на длине волны 1,31 мкм. При вогнутой деформации смещается интерференционная картина для излучения на длине волны 1,55 мкм, распространяющейся по дальнему измерительному волокну. На рисунке 3 представлено измеренное суммарное распределение сигналов на двух длинах волн на выходе второго интерферометра. Кривые 1 и 2 описывают экспериментальные значения интерференционного сигнала на длинах волн соответственно 1,31 и 1,55 мкм при отсутствии воздействия на измерительные волокна, кривая 3 описывает интерференционный сигнал при выпуклой деформации контролируемого объекта, т. е. при растяжении ближнего к объекту измерительного волокна, в котором распространяется сигнал на длине волны 1,31 мкм на 0,5 мм.

Как видно из рисунка 3, смещение пика интерференционной картины на выходе второго интерферометра прямо пропорционально величине воздействия на измерительное волокно. Точность определения максимума (величины деформации) обуславливается ошибкой позиционирования сканирующего зеркала (линии задержки). Поскольку шаг смещения зеркала при перемещении внутри пика равен 10 мкм, ошибку позиционирования можно считать равной 5 мкм.

Таким образом, сравнение взаимного положения боковых пиков интерференционной картины в исходном и деформированном состоянии на разных длинах волн позволяет определить, какое из измерительных волокон подвергается растяжению, т. е. определить направление деформации контролируемого объекта в плоскости его смещения.

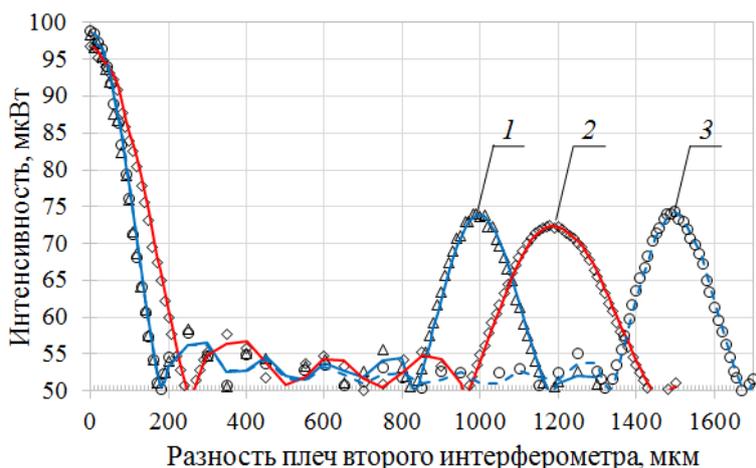


Рисунок 3. – Экспериментальная кривая огибающей интерференционной картины на выходе второго интерферометра

Датчик напряженности электрического поля. Для измерения напряженности внешних электрических полей нами предложен датчик на основе кольцевого микрорезонатора на базе волновода с вертикальной и горизонтальной щелью с заполнением жидким кристаллом (ЖК) [5–7]. Исследуемые структуры приведены на рисунке 4. Кольцевой микрорезонатор имеет набор резонансных длин волн [8]. Излучение, распространяющееся по входному волноводу на длинах волн, совпадающих с резонансными, поступает в кольцевой волновод. Оставшаяся часть излучения на других длинах волн распространяется дальше, практически не ответвляясь в микрорезонатор. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, в выходной волновод поступает излучение узких спектральных диапазонов, центральные длины волн которых соответствуют резонансным длинам волн микрорезонатора. Ширина этих диапазонов задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов, а также параметрами самого микрорезонатора.

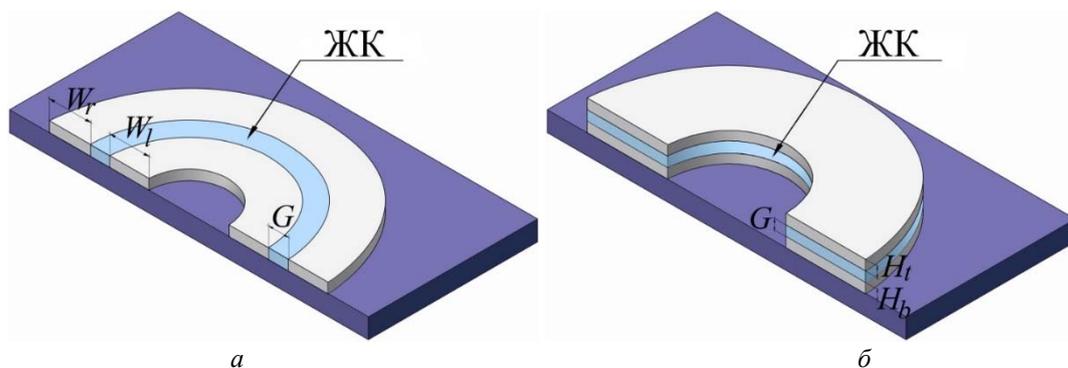


Рисунок 4. – Структуры микрорезонатора на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелью с заполнением ЖК

Если щелевой волновод с заполнением ЖК внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления ЖК, заполняющего щель, изменится пропорционально величине электрического поля. Это в свою очередь приведет к изменению эффективного показателя преломления щелевого волновода. В результате изменится оптическая длина кольцевого резонатора и сместится его резонансная длина волны. Это приведет к изменению интенсивности выходного сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора. Таким образом, измеряя интенсивность выходного оптического сигнала на выходе резонатора, можно определять напряженность электрического поля, воздействующего на резонатор [9].

На рисунке 5 показана зависимость сигнала на выходе кольцевых микрорезонаторов на базе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной ЖК, от напряженности внешнего электрического поля. Как видно из рисунка 5, датчики на основе горизонтальных щелевых волноводов более чувствительны к электрическому полю, чем вертикальные щелевые волноводы. Возможная причина этого – большие размеры

горизонтальной щели и, следовательно, большее количество заполняющего ее ЖК. При изменении напряженности электрического поля на 1 В/м ток фотодиода в таком датчике изменяется примерно на 150 нА (чувствительность датчика равна 150 нА/(В/м)). Датчик позволяет отслеживать изменение интенсивности электрического поля в пределах 1 В/м. Однако ширина диапазона измерений значительно уже в сравнении с датчиком с вертикальной щелью (порядка 10^5 В/м). При этом диапазон измерений может быть смещен выбором параметров резонатора или несущей длины волны оптического излучения. Так, например, начальное значение диапазона измерений на рисунке 5б смещено на величину 2×10^6 В/м. Таким образом, волноводы с вертикальной щелью можно использовать для грубого определения напряженности электрического поля, а резонаторы с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения.

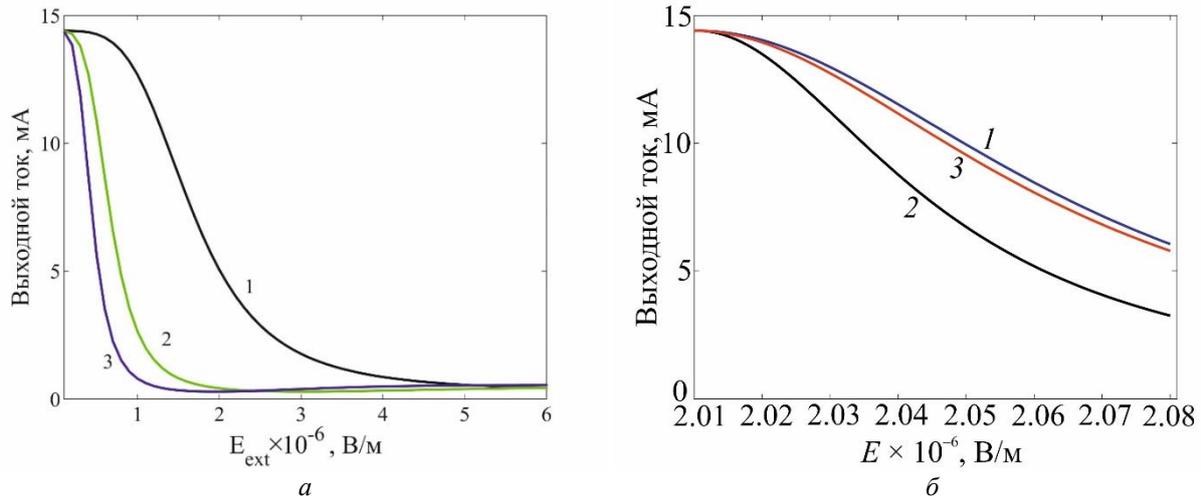


Рисунок 5. – Зависимость сигнала на выходе микрокольцевого резонатора на основе волновода с вертикальной (а) (ширина щели 100 (1), 200 (2), 300 (3) нм) и горизонтальной (б) (высота щели 150 (1), 250 (2) и 400 (3) нм) щелью, заполненной жидким кристаллом, от интенсивности внешнего электрического поля

Быстродействие устройства определяется временем установления стационарного режима в кольцевом микрорезонаторе и временем отклика ЖК. Изменение интенсивности оптического сигнала в кольцевом резонаторе представлено на рисунке 6. Кривые 1 и 3 построены для случая, когда значение эффективного показателя преломления ЖК $n_{жк}$ равно показателю преломления обыкновенной волны n_o , кривые 2 и 4 – при $n_{жк} = n_e$. Как следует из рисунка 6, через определенный временной интервал интенсивность оптического сигнала в резонаторе достигает насыщения, и в нем устанавливается стационарный режим. В кольцевом микрорезонаторе радиусом изгиба 16 мкм время установления стационарного режима составляет 24,10 пс (кривые 1 и 2), при радиусе изгиба 32 мкм стационарный режим устанавливается через 22,13 пс ($n_{жк} = n_o$, кривая 3) и 21,52 пс ($n_{жк} = n_e$, кривая 4).

Время отклика (время нарастания τ_n и время спада τ_c) ЖК может быть рассчитано при помощи выражений [10, 11]:

$$\tau_n = \frac{\gamma b^2}{K_{11} \pi^2} \left[\left(\frac{U}{U_\Phi} \right)^2 - 1 \right]^{-1}; \quad (1)$$

$$\tau_c = \frac{\gamma b^2}{K_{11} \pi^2}, \quad (2)$$

где K_{11} – коэффициент упругости, Н; γ – вращательная вязкость, Па·с; b – толщина слоя ЖК, м; U – приложенное напряжение, В; U_Φ – пороговое напряжение устройства, В.

Для ЖК 5СВ значения этих величин можно принять равными $K_{11} = 9,5$ пН; $\gamma = 0,125$ Па·с; $U_\Phi = 3,5$ В [11]. При напряжении порядка 10 В и ширине слоя ЖК (ширине

щели) b , равном 100 и 300 нм, рассчитанные суммарные значения времен нарастания и спада составляют приблизительно 0,01 и 0,12 мс соответственно.

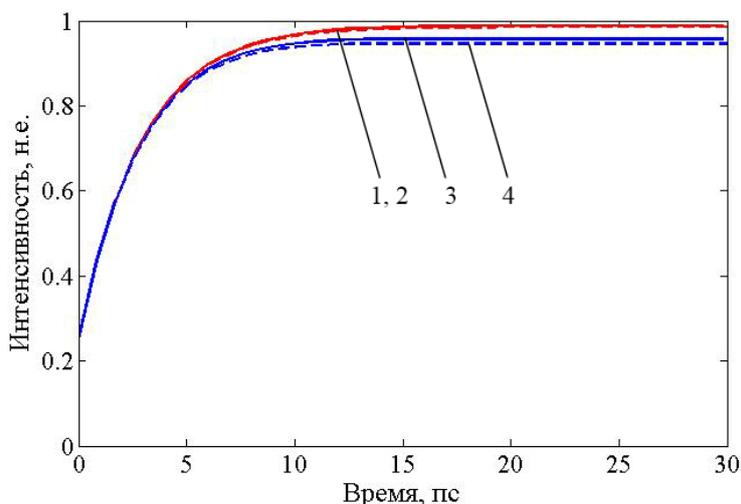


Рисунок 6. – Зависимость интенсивности оптического сигнала в кольцевых резонаторах с радиусом 16 (кривые 1, 2) и 32 (3, 4) мкм и коэффициентом связи 0,5 от времени. Кривые 1 и 3 соответствуют случаю, когда $n_{жк}$ равно показателю преломления обыкновенной волны n_o , 2 и 4 – показателю преломления необыкновенной волны n_e

Таким образом, быстродействие датчика на базе кольцевых микрорезонаторов на основе щелевых волноводов с ЖК заполнением ограничено в основном временем отклика ЖК и варьируется от десятков до сотен микросекунд, что позволяет измерять с их помощью переменные электрические поля с частотами до десятков кГц.

Заключение. В работе предложены конструкции и принципы функционирования датчиков на основе волноводных и волоконных резонаторов и интерферометров для измерения величины и направления деформаций измеряемых объектов и определения напряженности электрического поля. В основе датчиков лежат интерферометрические схемы, что позволяет достичь наибольшей точности измерения.

Векторный датчик на основе волоконных интерферометров позволяет измерять величину и направление деформаций и смещений измеряемых объектов. Диапазон измерения достигает 5 мм, точность определяется шагом перемещения сканирующего зеркала и на используемой элементной базе составила 10 мкм.

Датчик на основе микрокольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов, заполненных ЖК, позволяет измерять напряженность электрических полей в диапазоне от 10 до 3×10^6 В/м с точностью до 1 В/м. Быстродействие датчика ограничено временем отклика ЖК и варьируется от десятков до сотен микросекунд, что позволяет измерять с его помощью переменные электрические поля с частотами до десятков кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // Фотон-экспресс. Наука. – 2005. – № 6. – С. 128–140.
2. Passaro, V.M.N. Electromagnetic field photonic sensors / V.M.N. Passaro, F. Dell’Olio, F. De Leonardis // Progress in Quantum Electronics. – 2006. – Vol. 30. – P. 45–73.
3. Li, L. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications / L. Li [et al.] // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, № 10. – P. 11109–11120.
4. Thurner, K. Fiber-based distance sensing interferometry / K. Thurner [et al.] // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54, № 10. – P. 3051–3063.
5. Barrios, C.A. Label-free optical biosensing with slot waveguides / C.A. Barrios [et al.] // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33, № 7. – P. 708–710.
6. Dell’Olio, F. Optical sensing by optimized silicon slot waveguides / F. Dell’Olio, V.M. Passaro // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, № 8. – P. 4977–4993.
7. Kargar, A. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors / A. Kargar, C.Y. Chao // J. Opt. Soc. Am. A. – 2011. – Vol. 28, № 4. – P. 596–603.

8. Ibrahim, T.A. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection / T.A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim // *J. Lightwave Technol.* 2003. – Vol. 21. – P. 2997–3002.
9. Goncharenko, I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // *Applied Optics.* – 2017. – Vol. 56. – P. 7629–7635.
10. Shenoy, M.R. An electrically-controlled nematic liquid crystal core waveguide with a low switching threshold / M.R. Shenoy, M. Sharma, A. Sinha // *Journal of Lightwave Technology.* – 2015. – Vol. 33, № 10. – P. 1948–1953.
11. Yeh, P. *Optics of Liquid Crystal Displays.* 2nd ed. / P. Yeh, C. Gu. – Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009. – P. 21–47.

METHODS AND MEANS FOR MEASUREMENT OF EXTERNAL INFLUENCES ON THE BASE FIBER-OPTIC INTERFEROMETERS

Vitaly Reabtsev

Igor Goncharenko, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor

Aleksandr Ilyushonok, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

The State Educational Establishment «University of Civil Protection
of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The development of the design and operation principles of the sensor on the base of fiber-optic interferometers and resonators, the use of which provides increasing of measuring accuracy.

Findings. Vectorial sensor on the base of fiber interferometers makes it possible to measure the value and direction of the controlled object deformation. The measurement range is up to 5 mm, the accuracy is defined by the step of the scanning mirror shift and is 10 μm . The sensors on the base of slot waveguide ring micro resonators with LC filling can be used for measuring the external electric fields in the range between 0 and 3×10^6 V/m with accuracy up to 1 V/m. The operating speed of the device is defined by the response time of the LC. The operating speed of the proposed device is limited mostly by the response time of the LC and varies from tens to hundreds of microseconds. That allows measuring the variable electric fields with frequencies up to tens of KHz.

Application field of research. The developed structure and operating principle of the proposed devices can serve as a basis for creating fiber-optic sensors for measuring the pressure, displacement of the controlled object and the external electric fields intensity.

Conclusions. The presented research showed that the use sensors on the base of fiber-optic interferometers and resonators makes it possible to measure of the controlled object deformation and electric field intensity with high accuracy.

Keywords: michelson fiber optic interferometer, deformation, slot waveguide, liquid crystal, ring resonator, electric field intensity.

(The date of submitting: February 11, 2019)

REFERENCES

1. Garmash V.B., Egorov F.A., Kolomiets L.N., Neugodnikov A.P., Pospelov V.I. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii [Possibilities, tasks and perspectives of fiber-optic measuring systems in modern instrument engineering]. *Foton-ekspress. Nauka*, 2005. No. 6. Pp. 128–140. (rus)
2. Passaro V.M.N., Dell'Olio F., De Leonardis F. Electromagnetic field photonic sensors. *Progress in Quantum Electronics*, 2006. Vol. 30. Pp. 45–73.
3. Li L. et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications. *Optics Express*, 2012. Vol. 20, No. 10. Pp. 11109–11120.
4. Thurner K. et al. Fiber-based distance sensing interferometry. *Applied Optics*, 2015. Vol. 54, No. 10. Pp. 3051–3063.
5. Barrios C.A. et al. Label-free optical biosensing with slotwaveguides. *Optics Letters*, 2008. Vol. 33, No. 7. Pp. 708–710.
6. Dell'Olio F., Passaro V.M. Optical sensing by optimized silicon slot waveguides. *Optics Express*, 2007. Vol. 15, No. 8. Pp. 4977–4993.
7. Kargar A., Chao C.Y. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011. Vol. 28, No. 4. Pp. 596–603.
8. Ibrahim T.A., Cao W., Kim Y. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection. *J. Lightwave Technol*, 2003. Vol. 21. Pp. 2997–3002.
9. Goncharenko I., Marciniak M., Reabtsev V. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators. *Applied Optics*, 2017. Vol. 56. Pp. 7629–7635.
10. Shenoy M.R., Sharma M., Sinha A. An electrically-controlled nematic liquid crystal core waveguide with a low switching threshold. *Journal of Lightwave Technology*, 2015. Vol. 33, No. 10. Pp. 1948–1953.
11. Yeh P., Gu C. *Optics of Liquid Crystal Displays*. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009. Pp. 21–47.