

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.7.068

С.В. Васин, О.В. Иванов

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОПРОСА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ИЗГИБА НА ОСНОВЕ ВОЛОКНА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ¹

Васин Сергей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, окончил физико-технический факультет Ульяновского филиала Московского государственного университета. Старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Доцент кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи в области волоконной оптики, методов контроля параметров полупроводников и полупроводниковых приборов. [e-mail: s.vasin@outlook.com].

Иванов Олег Витальевич, доктор физико-математических наук, окончил физико-технический факультет Ульяновского филиала МГУ. Ведущий научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, научный сотрудник научно-исследовательского технологического института Ульяновского государственного университета. Профессор кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет монографии и статьи в области волоконной оптики, оптики анизотропных сред и тонких пленок. [e-mail: olegivvit@yandex.ru].

Аннотация

Разработана и реализована схема управления и опроса волоконно-оптического датчика изгиба, структура которого образована вставкой отрезка волокна SM630 с двойной оболочкой между стандартными одномодовыми волокнами SMF-28. Принцип действия датчика основан на преобразовании мод сердцевинки и оболочки, связь между которыми происходит на стыке волокон, имеющих различные профили показателя преломления. Для опроса датчика используются два лазерных диода, излучающих на длинах волн 1328 и 1545 нм, на которых зависимости пропускания волокна от изгиба существенно различны. Управление источниками и сбор данных с фотоприемника реализован с помощью микроконтроллера. Показано, что предложенная и реализованная схема датчика позволяет измерять изгибы с радиусами кривизны от нескольких метров до 26 см с погрешностью измерения кривизны менее 1%.

Ключевые слова: оптическое волокно, оболочечные моды, оптоволоконный датчик изгиба.

DEVELOPMENT OF A CONTROL AND INTERROGATION SCHEME OF A FIBER-OPTIC BEND SENSOR BASED ON DOUBLE CLADDING FIBER

Sergei Viacheslavovich Vasin, Candidate of Physics and Mathematics; graduated from Physics and Technology Faculty of Ulyanovsk branch of Moscow State University; Senior Scientist at Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of the Russian Academy of Sciences (RAS); Associate Professor at the

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-730738.

Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of fiber optics, methods of inspection of semiconductors and semiconductor devices. e-mail: s.vasin@outlook.com.

Oleg Vitalevich Ivanov, Doctor of Physics and Mathematics; graduated from Physics and Technology Faculty of Ulyanovsk branch of Moscow State University; Scientist at Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics and at Technological Research Institute of Ulyanovsk State University; Professor at the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of fiber optics, optics of anisotropic media and thin films. e-mail: olegivvit@yandex.ru.

Abstract

The control and interrogation scheme of the fiber optic bend sensor was developed and implemented. The structure of the sensor is formed by inserting a section of SM630 fiber with double cladding between standard SMF-28 single-mode fibers. The operating principle of the sensor is based on conversion between core and cladding modes. The modes are coupled at the junction of the fibers with different refractive index profiles. Two laser diodes with the wavelengths of 1328 and 1545 nm are used for sensor interrogation. At these two wavelengths, the dependences of fiber transmittance on bending are significantly different. A microcontroller is used to control and collection data from a photodetector. The article shows that the proposed and implemented scheme allows the sensor to measure bends with curvature radii from meters to 26 cm with a measurement error less than 1%.

Key words: optical fiber, cladding modes, fiber optic bend sensor.

ВВЕДЕНИЕ

Датчики, основанные на использовании оболочечных мод оптического волокна, применяются для измерения температуры, деформаций различных типов, показателя преломления, химического состава среды и других параметров [1, 2]. Принцип действия указанных датчиков основан на высокой чувствительности оболочечных мод к внешним воздействиям, оказываемым на оптическое волокно, в оболочке которого распространяются указанные моды. Кроме того, оболочечные моды чувствительны к оптическим параметрам внешней среды, таким как показатель преломления и поглощения (усиления), что связано с распространением поверхностного поля оболочечных мод вдоль оболочки волокна, соприкасающейся с внешней средой.

Ранее была предложена структура, основанная на вставке волокна SM630 с двойной оболочкой и малой сердцевинной между стандартными волокнами [3–6]. В спектре пропускания исследованной структуры наблюдаются широкие провалы, связанные со сближением постоянных распространения волоконных мод [7, 8]. Как было показано, положение провалов зависит от кривизны волокна [4]. В работах [9, 10] предложено указанную зависимость использовать для создания датчика изгиба.

Существуют различные способы опроса датчиков [11]. В волоконных датчиках регистрируются изменения спектра для определения измеряемой датчиком величины. Самые простые способы опроса связаны с применением узкополосных оптических фильтров. Более сложные схемы основаны на записи всего спектра сигнала и наблюдением за модификацией спектра. Однако такие схемы требуют использования дорогих устройств, разлагающих принимаемое излучение в непрерывный спектр (спектрального анализатора, дифракционной решетки).

В данной работе реализован автоматизированный датчик, основанный на схеме сравнения оптического пропу-

скания на двух различных длинах волн. В качестве источников света применены лазерные диоды, работающие на стандартных длинах волн 1328 и 1545 нм, используемых в телекоммуникации. Управление и сбор данных осуществляется с помощью микроконтроллера. Исследуется диапазон величин изгиба, доступных для измерения с помощью предлагаемого датчика, а также точность измерений.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКА

Используемая для создания датчика волоконно-оптическая структура образована вставкой отрезка волокна SM630 фирмы 3M Specialty Optical Fibre между двумя отрезками стандартного волокна SMF-28 ($r_{co} = 4,2$ мкм, $\Delta = 0,36\%$, $NA = 0,14\%$, $\lambda_{cutoff} = 1260$ нм). Стыки отрезков волокна соединяются с использованием обычного аппарата для сварки оптических волокон.

Волокно SM630, используемое в качестве вставки, как показали измерения его профиля показателя преломления, имеет внутреннюю оболочку с показателем преломления n_{inn} ниже показателя преломления внешней оболочки n_{cl} : $n_{cl} - n_{inn} = 0,0043$. Радиус внутренней оболочки составляет 25 мкм. Сердцевина волокна имеет радиус более чем вдвое меньший радиуса стандартного волокна: $r_{co} = 1,8$ мкм. Разница между показателями преломления сердцевин n_{co} и внутренней оболочки составляет $n_{co} - n_{inn} = 0,0054$.

На первом стыке волокон SMF-28 и SM630, имеющих различные параметры сердцевин, мощность из моды сердцевин волокна SMF-28 распределяется между модами второго волокна, вследствие того, что профили мод двух волокон различны. От первого стыка моды распространяются по отрезку волокна SM630 ко второму стыку. При этом часть энергии рассеивается в результате передачи ее модам высоких порядков, имеющим высокие потери на поверхности волокна, и излучательным модам.

На втором стыке моды волокна SM630 преобразуются в моды сердцевинки волокна SMF-28, где интерферируют друг с другом. Там же часть излучения попадает в оболочку волокна SMF-28, где теряется, не возвращаясь в его сердцевину. Вставка волокна SM630 была окрашена черной краской, что необходимо для увеличения потерь мод высоких порядков и устранения их интерференционных вкладов. Схема распространения излучения в структуре представлена на рисунке 1.

Исследования описанной структуры, проведенные ранее [3], показали, что в ее спектре присутствуют два основных провала на длинах волн 1185 и 1450 нм. Также была обнаружена особенность структуры, заключающаяся в том, что спектры пропускания сильно изменяются при изгибе волокна-вставки [12]. Предложенная структура достаточно проста в изготовлении и не содержит никаких элементов, кроме оптических волокон, поэтому обнаруженная зависимость спектров пропускания от изгиба волокна может быть использована при создании полностью оптоволоконного датчика изгиба, отличающегося высокой температурной и радиационной стойкостью, совпадающей со стойкостью самих волокон, использованных при создании оптической структуры.

МЕТОД ОПРОСА ДАТЧИКА

Как отмечалось выше, существуют различные методы опроса датчиков, начиная со схемы с измерением спектра и наблюдением за его трансформацией (сдвигом, изменением амплитуды и др.) при воздействии на волокно. Нами использован способ измерения сдвига спектра при изгибе волокна с использованием двух источников света на разных длинах волн, когда прохождение на одной длине волны зависит от кривизны волокна, а величина пропускания на другой длине волны является опорной.

В связи с доступностью излучателей на длинах волн, используемых в телекоммуникации, а именно около 1310 и 1550 нм, мы разработали схему, в которой источник на длине волны 1310 нм является опорным (пропускание на этой длине волны слабо зависит от изгиба структуры), а источник на длине волны 1550 нм является сигнальным. Чтобы исключить влияние изменений интенсивности излучения, не связанных с изгибом чувствительной части волокна и не зависящих от длины волн, в каче-

стве величины, описывающей изгиб, находится отношение пропускания на длине волны 1328 нм к пропусканию на длине волны 1545 нм:

$$K = 10 \cdot \lg \frac{T(1328 \text{ нм})}{T(1545 \text{ нм})} \tag{1}$$

Структурная схема устройства приведена на рисунке 2. Устройство состоит из двух лазерных диодов, фотоприемника, оптоволоконного разветвителя, блока управления и, собственно, чувствительного элемента датчика.

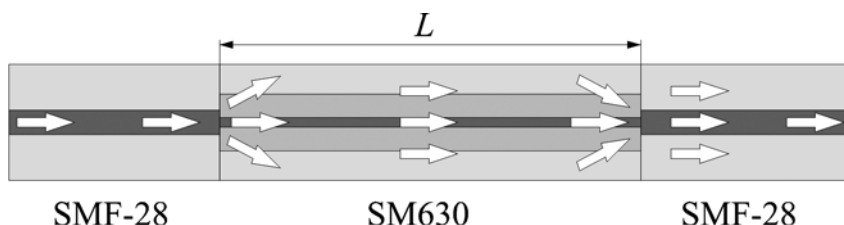


Рис. 1. Схема распространения световых лучей в волоконной структуре

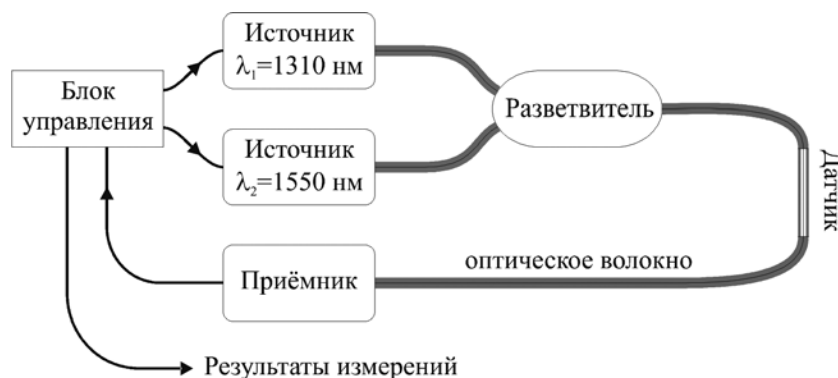


Рис. 2. Схема опроса оптоволоконного датчика изгиба

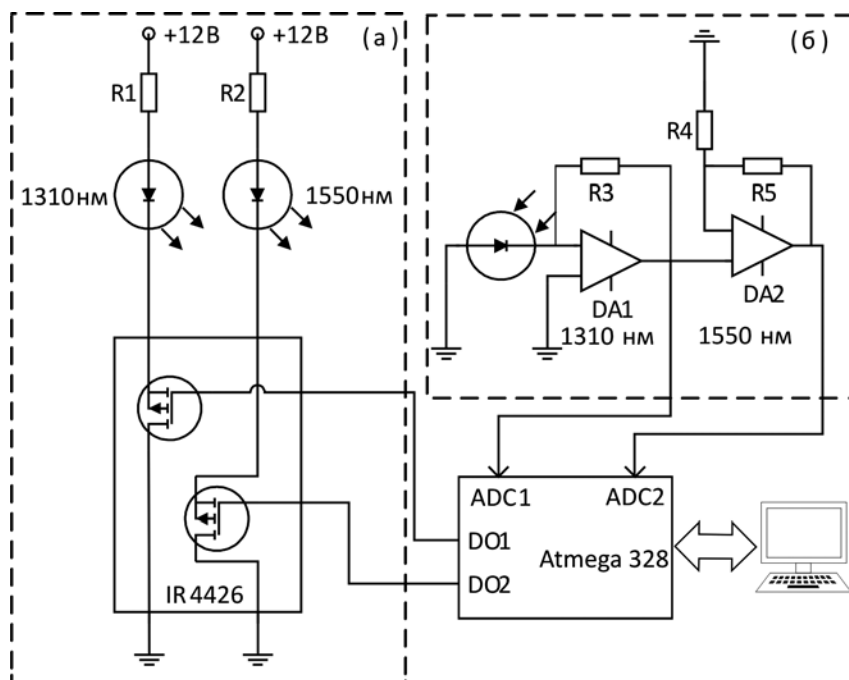


Рис. 3. Структурная схема блока управления оптоволоконного датчика изгиба: блок управления источниками (а) и блок приема сигнала (б)

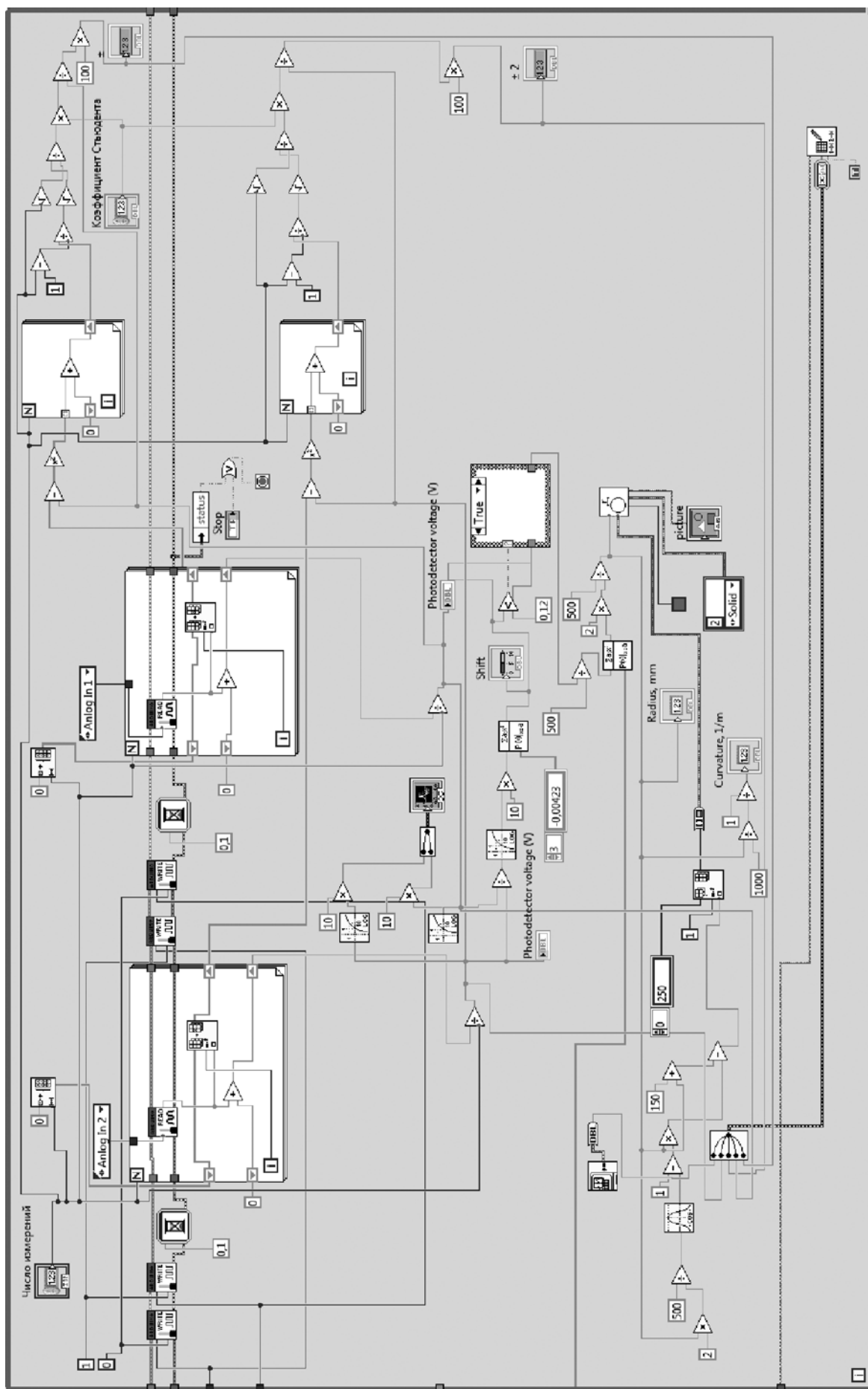


Рис. 4. Фрагмент блочной диаграммы виртуального прибора в среде LabView

Блок управления используется для последовательного переключения источников и синхронной записи показаний фотоприемника, на который поступает излучение, пришедшее от одного из источников через разветвитель и чувствительный элемент датчика.

РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОПРОСА

Для создания блока управления, включающего в себя схему переключения источников и схему приема и обработки сигнала с фотоприемника, был использован микроконтроллер ATmega328 (рис. 3). Схема переключения источников реализована на микросхеме драйверов ключей нижнего уровня IR4426, управляемой цифровыми сигналами микроконтроллера.

Поскольку разница в уровнях сигналов от источников 1310 нм и 1550 нм достигает 20 дБ, схема обработки сигнала с фотоприемника реализована на двух операционных усилителях. Сигнал от источника 1310 нм снимается с выхода первого операционного усилителя (DA1). Сигнал от источника 1550 нм дополнительно усиливается вторым операционным усилителем (DA2). Для оцифровки сигнала с выходов операционных усилителей используется встроенный в микроконтроллер 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Работа датчика осуществляется под управлением персонального компьютера. Программное обеспечение реализовано в среде LabView. Фрагмент блочной диаграммы, описывающий логику работы виртуального прибора и внешний вид панели управления виртуального прибора приведены на рисунках 4 и 5, соответственно.

Реализованный в программном обеспечении функционал позволяет производить переключение и опрос источников сигнала с заданной частотой, вычислять изгиб пластины с помощью построенной заранее калибровочной функции, проводить усреднение по произвольному количеству измерений либо фильтрацию сигнала и определять погрешность полученного результата. Также в программе реализован функционал визуализации степени изгиба волоконного датчика.

Для изгиба волоконной структуры вдоль радиуса заданной кривизны мы поместили волокно внутри гибкой полимерной трубки, закрепленной по краю упругой металлической пластины длиной 50 см. Отрезок волокна с двойной оболочкой длиной 14 см был расположен посередине металлической пластины, поэтому при деформации пластины он изгибался симметрично относительно своего центра. Концы пластины упираются в стойки, одна из которых может смещаться вдоль шкалы с помощью винта и сжимать пластину, которая при этом изгибается (рис. 6).

Кривизна пластины в ее центре является однозначной функцией расстояния между ее концами. Чтобы найти эту функцию, были численно решены дифференциальные уравнения, описывающие изгиб пластины. Найденные значения для уменьшения вычислительных затрат при определении радиуса кривизны аппроксимировались полиномом, коэффициенты которого вводились в память микроконтроллера.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ ДАТЧИКА

Интенсивность излучения, проходящего через волоконно-оптическую систему, в зависимости от смещения металлической пластины приведена на рисунке 7. Для излучения на длине волны 1328 нм изменение интенсивности при увеличении кривизны волокна зависит почти линейно от смещения и приводит к уменьшению сигнала при максимальном изгибе на величину около 30%. Амплитуда сигнала на длине волны 1545 нм имеет зависимость, близкую к экспоненциальной, и стремится при изгибе порядка 100 мм к нулевому значению (предельному разрешению для 10-битного АЦП).

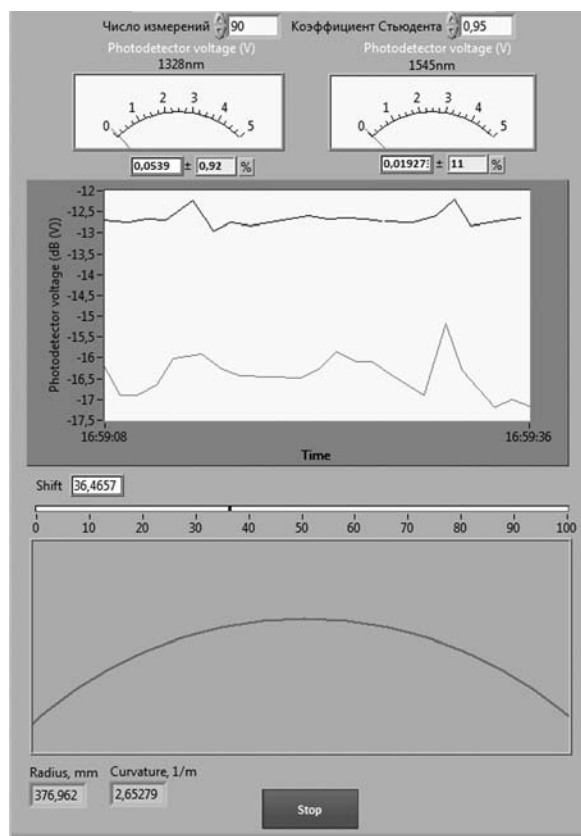


Рис. 5. Внешний вид панели управления виртуального прибора

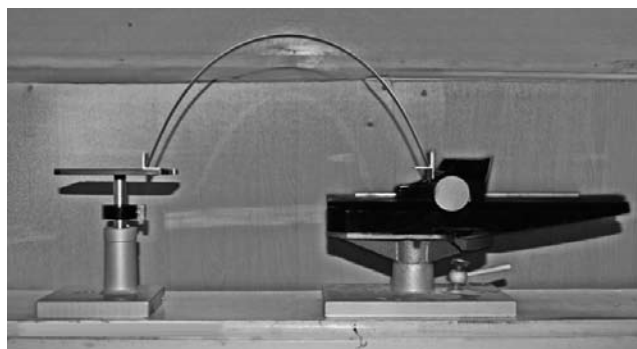


Рис. 6. Установка для изгиба волоконной структуры

На рисунке 8 приведена зависимость величины K от изгиба пластины, рассчитанная по формуле (1). Из рисунка видно, что отношение интенсивностей монотонно спадает при сжатии пластин, что позволяет использовать данную величину для определения степени изгиба волокна. Величина погрешности, связанной с шумовой составляющей источников, приемника и схемы обработки сигнала, остается в пределах 1% при сжатии пластины до 70 мм, соответствующей радиусу кривизны около 26 см. Аппроксимация зависимости смещения конца пластины от коэффициента K полиномом четвертой степени показана на рисунке 8 линией. Коэффициенты данного полинома подаются на вход управляющей программы для вычисления изгиба пластины по измеренным значениям напряжения на выходе операционных усилителей в режиме реального времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами разработан волоконно-оптический датчик изгиба, структура которого образована вставкой отрезка волокна SM630 с двойной оболочкой между стандартными одномодовыми волокнами SMF-28. Реализована схема опроса датчика с использованием двух лазерных диодов и фотоприемника, управляемых с помощью микроконтроллера ATmega328. Габариты чувствительного элемента датчика составляют 1x1x100 мм, а блока обработки сигнала – 160x130x40 мм. Измеряемые датчиком изгибы лежат в диапазоне с радиусами кривизны от нескольких метров до 26 см с погрешностью менее 1%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов О.В., Никитов С.А., Гуляев Ю.В. Оболочечные моды волоконных световодов, их свойства и применение // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 2. – С. 175–202.
2. Иванов О.В., Никитов С.А. Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 252 с.
3. Ivanov O.V. Fiber-optic interferometer formed by a section of small-core fibre spliced between standard fibres // Opt. Comm. – 2009. – V. 282. – pp. 3895–3898.
4. Ivanov O.V., Zlodееv I.V. Fiber structure based on a depressed inner cladding fiber for bend, refractive index and temperature sensing // Meas. Sci. and Technol. – 2014. – V. 25. – 015201 (8pp).
5. Злодеев И.В., Иванов О.В. Исследование применения волоконных структур на основе отрезка волокна с двойной оболочкой в качестве датчиков изгиба и показателя преломления // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 1068–1073.
6. Злодеев И.В., Иванов О.В. Волоконная структура на основе отрезка волокна с двойной оболочкой как датчик температуры и натяжения // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 4 (5). – С. 978–981.
7. Pang F., Xiang W., Guo H., Chen N., Zeng X., Chen Z. and Wang T. Special optical fiber for temperature sensing based

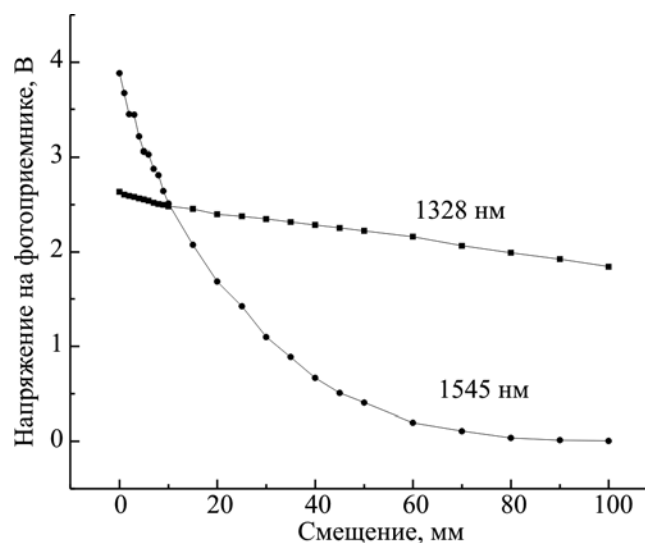


Рис. 7. Зависимость напряжения на фотоприемнике с учетом усиления от смещения конца пластины для двух длин волн

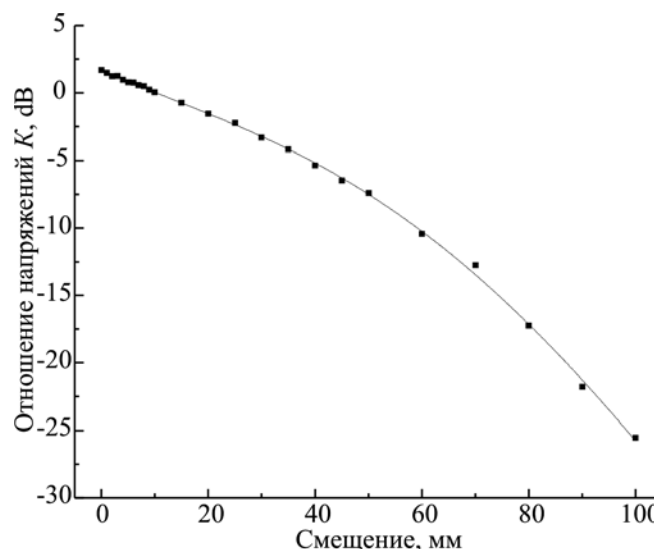


Рис. 8. Зависимость рассчитанной по формуле (1) величины K от изгиба пластины

on cladding-mode resonance // Opt. Express. – 2008. – V. 16. – pp. 12967–12972.

8. Pang F., Liang W., Xiang W., Chen N., Zeng X., Chen Z. and Wang T. Temperature-insensitivity bending sensor based on cladding-mode resonance of special optical fiber // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2009. – V. 21. – pp. 76–78.

9. Ivanov O.V., Chertoriyskiy A.A. Fiber-Optic Bend Sensor Based on Double Cladding Fiber // Journal of Sensors. – 2015. – Article ID 726793. – 6 pp.

10. Иванов О.В., Черторийский А.А. Волоконно-оптический датчик изгиба на основе преобразования мод в волокне с двойной оболочкой // Датчики и системы. – 2015. – Т. 196, № 9. – С. 64–69.

11. Сергеев В.А., Беринцев А.В. Оценка погрешности тепловой природы измерительных преобразователей с дифференциальным включением датчиков // Автома-

тизация процессов управления. – 2015. – № 1 (39). – С. 99–105.

12. Злодеев И.В., Иванов О.В. Спектры пропускания структуры на основе отрезка волокна с двойной оболочкой при изгибе // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 6. – С. 535–541.

REFERENCES

- Ivanov O.V., Nikitov S.A., Guliaev Iu.V. Obolochecnyye mody volokonnykh svetovodov, ikh svoistva i primeneniye [Cladding Modes of Optical Fibers: Properties and Applications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi. Advances in Physical Sciences], 2006, vol. 176, no. 2, pp. 175–202.
- Ivanov O.V., Nikitov S.A. *Obolochecnyye mody volokonnykh svetovodov i dlinnoperiodnye volokonnye reshetki* [Cladding Modes of Optical Fibers and Long-Period Fiber Gratings]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 252 p.
- Ivanov O.V. Fiber-Optic Interferometer Formed by a Section of Small-Core Fiber Spliced Between Standard Fibers. *Opt. Comm.*, 2009, vol. 282, pp. 3895–3898.
- Ivanov O.V., Zlodeev I.V. Fiber Structure Based on a Depressed Inner Cladding Fiber for Bend, Refractive Index and Temperature Sensing. *Meas. Sci. and Technol.*, 2014, vol. 25, 015201, 8 p.
- Zlodeev I.V., Ivanov O.V. Issledovanie primeneniia volokonnykh struktur na osnove otrezka volokna s dvoinoi obolochkoi v kachestve datchikov izgiba i pokazatelia prelomleniia [Investigation of Application of Fiber Structures Based on A Section of Double Cladding Fiber for Bend and Refractive Index Sensing]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, no. 4, pp. 1068–1073.
- Zlodeev I.V., Ivanov O.V. Volokonnaia struktura na osnove otrezka volokna s dvoinoi obolochkoi kak datchik temperatury i natiazheniia [The Fiber Structure on the Basis of the Segment Double-Clad Fiber as a Temperature Sensor and a Tension]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 4 (5), pp. 978–981.
- Pang F., Xiang W., Guo H., Chen N., Zeng X., Chen Z. and Wang T. Special Optical Fiber for Temperature Sensing Based on Cladding-Mode Resonance. *Opt. Express.*, 2008, vol. 16, pp. 12967–12972.
- Pang F., Liang W., Xiang W., Chen N., Zeng X., Chen Z. and Wang T. Temperature-Insensitivity Bending Sensor Based on Cladding-Mode Resonance of Special Optical Fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, vol. 21, pp. 76–78.
- Ivanov O.V., Chertoriiskii A.A. Fiber-Optic Bend Sensor Based on Double Cladding Fiber. *Journal of Sensors*, 2015, Article ID 726793, 6 pp.
- Ivanov O.V., Chertoriiskii A.A. Volokonno-opticheski datchik izgiba na osnove preobrazovaniia mod v volokne s dvoinoi obolochkoi [A Fiber-Optic Bend Sensor Based on Mode Coupling in a Double Cladding Fiber]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2015, vol. 196, no. 9, pp. 64–69.
- Sergeev V.A., Berintsev A.V. Otsenka pogreshnosti teplovoi prirody izmeritelnykh preobrazovatelei s differentsialnym vklucheniem datchikov [Error Estimation of Thermal Conditions of Measurement Transducers with Differential Connection of Sensors]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no.1 (39), pp. 99–105.
- Zlodeev I.V., Ivanov O.V. Spektry propuskaniya struktury na osnove otrezka volokna s dvoynoy obolochkoy pri izgibe [Transmission Spectra of a Double-Clad Fiber Structure Under Bending]. *Kvantovaiia elektronika* [Quantum Electronics], 2013, vol. 43, no. 6, pp. 535–541.