

УДК 535.92

## ВЫСОКОТОЧНЫЙ ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК АБСОЛЮТНЫХ РАССТОЯНИЙ

Молодцов В. В., Фукин И. И., Чуренков У. В.

*«Московский Физико-Технический Институт», Москва, Россия (141701, Долгопрудный, Институтский пер., 7), e-mail: [molvlad@frtk.ru](mailto:molvlad@frtk.ru)*

По мере развития промышленности всё чаще встаёт задача точного измерения расстояний. Наиболее перспективными в этой области являются интерферометрические датчики, поскольку они способны обеспечить точность измерений, сравнимую с длиной волны видимого света. Однако подобные датчики, как правило, довольно громоздки, что затрудняет их использование в большинстве случаев. Более того, для измерений абсолютных расстояний необходимо производить стабилизацию рабочей точки, относительно которой будут отсчитываться относительные смещения, для реализации чего используются различные электронные схемы, которые неспособны работать в агрессивных средах, например, при высокой температуре и влажности или при повышенном электромагнитном воздействии. Решением данных проблем может стать применение оптического волокна, что позволит создать измерительную систему с миниатюрной и устойчивой к агрессивным средам чувствительной частью, которая будет располагаться на удалении от основной системы. В представленном исследовании демонстрируются физические принципы, на основе которых возможно создать такую систему, причем оптоволокно выступает в ней частью интерферометра Фабри-Перо. Результатом работы является экспериментальное обоснование фундаментальной возможности высокоточного измерения абсолютных расстояний с помощью предложенного метода.

Ключевые слова: оптоволокно, высокоточное измерение абсолютных расстояний, интерферометрический датчик, спектроанализатор, интерферометр Фабри-Перо.

## HIGH-PRECISION OPTICAL FIBER SENSOR FOR ABSOLUTE DISTANCES MEASUREMENTS

Molodtsov V. V., Fukin I. I., Churenkov U. V.

*«Moscow Institute of Physics and Technology», Moscow, Russia (141701 Russia, Moscow, Institutsky per., 7), e-mail: [molvlad@frtk.ru](mailto:molvlad@frtk.ru)*

While industry is developing, it is often necessary to precisely measure distances. The interference sensors are the most perspective tools in this field, since they are able to provide measurement accuracy, compared with the visible light wavelength. However, such sensors are quite large and inconvenient in the most cases. Moreover, for measuring absolute distances, it is necessary to stabilize the operating point, relative to which displacements will be counted. For that purpose various electronic circuits are used that are unable to work in aggressive environments, for example, at high temperature and humidity or with increased electromagnetic exposure. Using optical fiber may be the solution of this problem, that allows to create measurement system, which has miniature and stable to aggressive environments sensitive part. The present paper demonstrated the physical principles on the basis of which it is possible to create such a system, and the optical fiber is the part of the Fabry-Perot interferometer here. The result of the current work is the experimental substantiation of the fundamental possibility of high-precision measurement of absolute distances using the proposed method.

Keywords: optical fiber, high-precision absolute distances measurements, interference sensor, spectrum analyzer, Fabry-Perot interferometer.

Одной из проблем интерферометрических датчиков<sup>[4]</sup> является необходимость определения и стабилизации рабочей точки, относительно которой отсчитываются относительные смещения. Для реализации этого механизма используются различные электронные схемы, которые не способны функционировать в агрессивных средах<sup>[6]</sup>, например, при повышенном электромагнитном воздействии.

Такой проблемы лишен предлагаемый нами датчик, который вместо измерения смещений относительно некой точки, принимаемой за начальное положение, определяет абсолютные расстояния, благодаря чему отпадает надобность в нахождении, а также стабилизации рабочей точки. Кроме того, за счет использования оптического волокна<sup>[5]</sup>, разработанного для высокоскоростной передачи данных на большие расстояния, но нашедшего широкое применение и в других областях, чувствительный элемент рассматриваемого датчика обладает малым весом и объемом и может быть размещен на удалении от остальной системы, что позволяет производить измерения в агрессивных средах: в условиях пожаро- и взрывоопасности, при повышенной температуре, влажности, давлении и т.д.<sup>[3]</sup>.

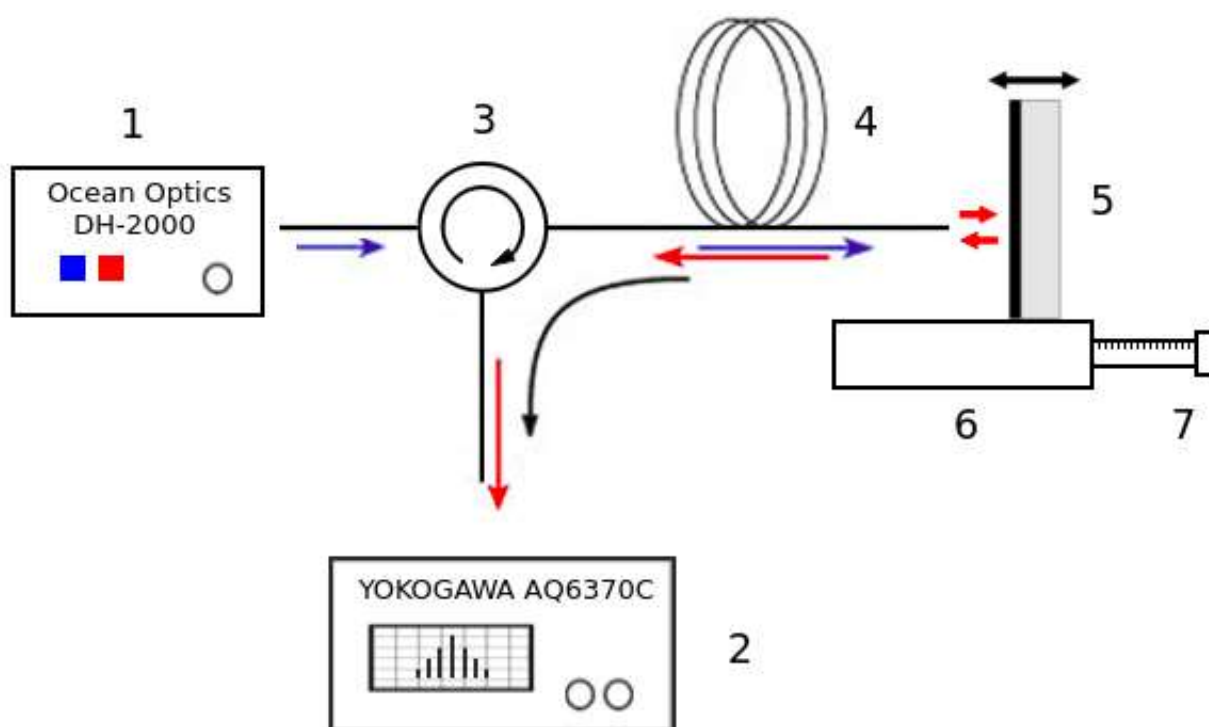


Рисунок 1 – Схема установки для измерения абсолютных расстояний

В основе исследуемой системы лежит интерферометр Фабри-Перо, суть которого заключается в том, что он образован двумя зеркалами, между которыми происходит переотражение света. В нашем случае в роли одного зеркала выступает торец оптического волокна 4, а в роли другого - отражающая поверхность 5, установленная на подложке 6, как показано на рисунке 1. Положение второго зеркала регулируется с помощью микрометрического винта 7, с помощью которого можно также измерять, насколько смещается зеркало относительно какой-либо точки. Стоит отметить, что

оптоволокно в представленной системе, с одной стороны, является каналом, по которому в интерферометр Фабри-Перо вводится излучение, а с другой - средой, по которой сигнал передается от чувствительного элемента, интерферометра, к вычислительной системе 2 - спектроанализатору Yokogawa AQ6370C, который позволяет определять мощность приходящего на него сигнала в зависимости от частоты. Именно благодаря такой конструкции и обеспечивается удаление электроники на безопасное расстояние, в то время как сам чувствительный элемент может находиться в различных агрессивных средах, например, при высокой температуре или при повышенных воздействиях электромагнитного поля.

Далее рассмотрим более детально принцип работы интерферометра Фабри-Перо в нашем случае. Введенное в канал излучение от источника 1, в роли которого выступает Ocean Optics DH-2000, через оптический циркулятор<sup>[1]</sup> 3 (рис. 1) попадает в вышеупомянутый интерферометр. Далее обратим внимание на два луча в интерферометре: один из них сразу отражается от торца волокна, а второй покидает канал и отражается уже от зеркальной поверхности, причем происходит так называемая потеря половины длины волны. В таком случае разность хода между двумя такими лучами равняется:

$$\Delta = 2x_0 + \frac{\lambda}{2},$$

где  $\lambda$  - длина волны падающего излучения, а  $x_0$  - искомое абсолютное расстояние между торцом оптоволокна и отражающей поверхностью, то есть длина кюветы интерферометра Фабри-Перо. Коэффициенты отражения от торца и от поверхности зеркала в нашем случае достаточно малы, поэтому кратными переотражениями можно пренебречь и работать с приближением двулучевой интерференции. Иначе говоря, в нашем случае интерферометр Фабри-Перо не является резонатором, а лишь создает разность фаз между двумя лучами: отраженным от торца оптического волокна и прошедшим через него.

Отметим, что циркулятор здесь нужен для того, чтобы при проходе по каналу в одну сторону сигнал попадал в интерферометр, а при проходе в обратную сторону - в спектроанализатор. В основе оптического циркулятора лежит продольный магнитооптический эффект Фарадея: при распространении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество наблюдается вращение плоскости поляризации света пропорционально величине действующего на него магнитного поля. Для более качественного понимания сути работы циркулятора на рисунке 2 представлена его схема, причем поворот поляризации за счет эффекта Фарадея осуществляет так называемый фарадеевский вращатель, изображенный под номером 4. В данной реализации вращатель осуществляет поворот на 45 градусов, причем направление вращения не зависит от направления распространения света, в отличие от полуволновой пластинки 5, которая также осуществляет поворот на те же 45 градусов, но направление вращения уже меняется при изменении направления прохождения. Если теперь добавить к ним двояколучепреломляющие поляроиды 3, разносящие в пространстве обыкновенные и необыкновенные лучи, то при прохождении в одну сторону свет будет проходить от порта 1 к порту 3, а при прохождении в обратную сторону - будет попадать на отражающую призму 2 и светоотделительную призму 1, а

затем проходить в порт 2.

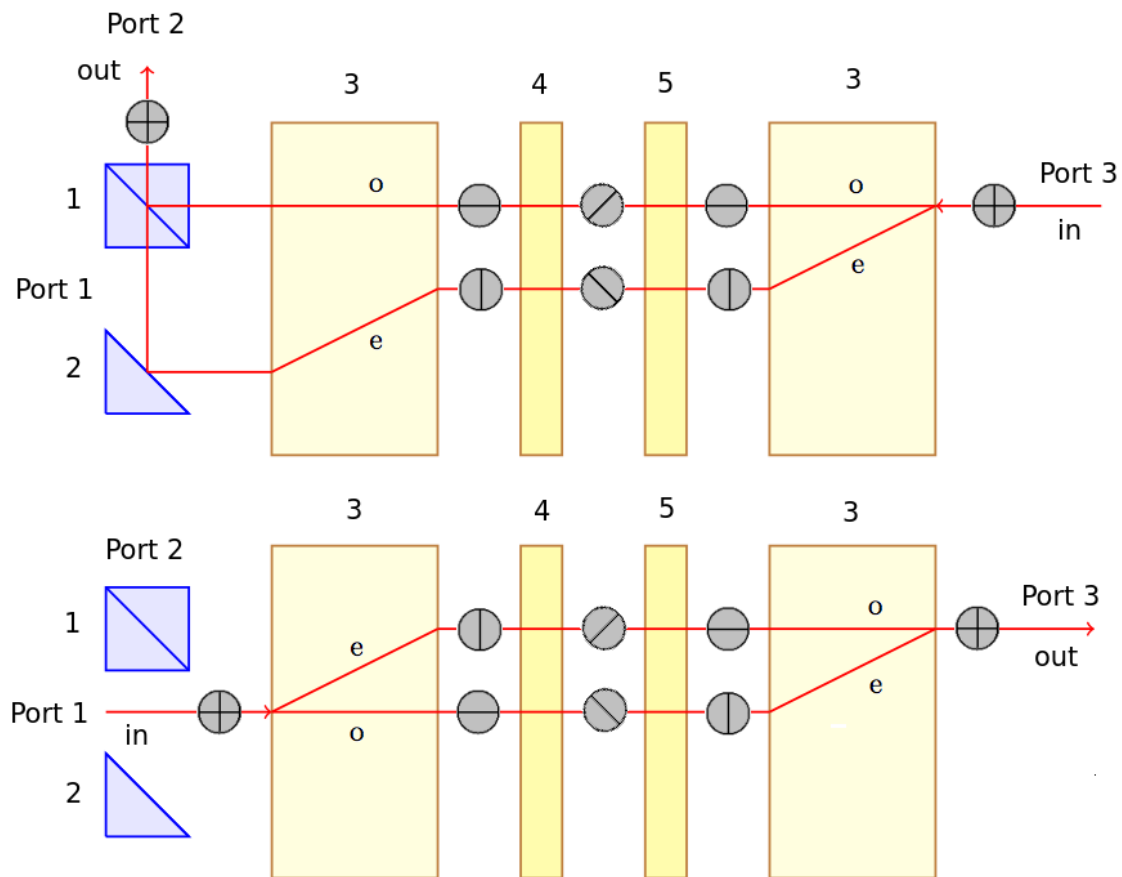


Рисунок 2 – Схема оптического циркулятора

Наконец, перейдем к рассмотрению излучения от широкополосного источника, спектр которого изображен на рисунке 3. Это излучение можно представить как бесконечное количество монохроматических волн разной длины, которые интерферируют независимо друг от друга. В таком случае, максимум отраженного сигнала соответствует именно тем длинам волн, при которых разность хода между двумя лучами в интерферометре соответствует целому числу длин полуволен:

$$\Delta = 2x_0 + \frac{\lambda}{2} = m\lambda,$$

где  $m$  - порядок интерференции, номер максимума.

Отсюда получаем, что

$$2x_0 = \lambda \left( m - \frac{1}{2} \right). \quad (1)$$

Далее обратимся к рисунку 3, на котором изображены спектры отраженного сигнала при различных положениях микрометрического винта. Здесь можно пронаблюдать локальные максимумы на определенных длинах волн, причем максимумы чередуются тем чаще, чем больше искомое расстояние между торцом оптоволокна и отражающей поверхностью. Важно отметить, что величина  $\frac{1}{\lambda}$  линейно зависит от порядка интерференции  $m$  с коэффициентом пропорциональности  $k = 1/2x_0$ :

$$\frac{1}{\lambda} = km + const. \quad (2)$$

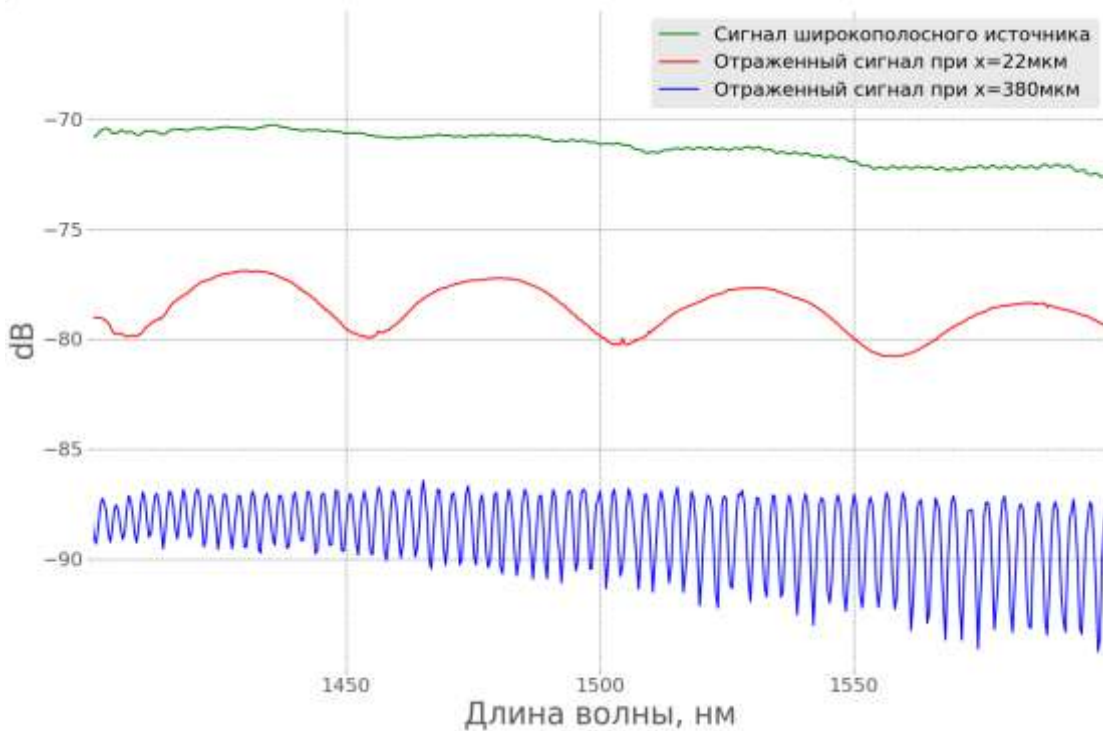


Рисунок 3 – Спектры: 1 – сигнала от широкополосного источника, 2 – отраженного сигнала при  $x_0 = 22\text{мкм}$ , 3 – отраженного сигнала при  $x_0 = 380\text{мкм}$ .

Для определения искомого расстояния  $x_0$  теперь необходимо всего лишь определить тангенс угла наклона графика зависимости  $1/\lambda$  от  $m$ . Так, например, в случае спектра 2 на рисунке 3 коэффициент  $k = 22700 \pm 20\text{м}^{-1} \Rightarrow x_0 = 22.03 \pm 0.02\text{мкм}$ . В дальнейшем процедуру нахождения максимумов можно автоматизировать, например, написав соответствующую программу, которая будет по набору точек со спектроанализатора определять положения максимумов и рассчитывать необходимый коэффициент, чтобы затем выдавать на выход искомое расстояние между торцом оптоволокна и поверхностью зеркала.

Теперь докажем объективность предлагаемого метода. Для этого необходимо измерить то же самое абсолютное расстояние между торцом оптоволокна и зеркалом каким-либо альтернативным способом, но в нашем случае это не представлялось возможным в виду отсутствия высокоточного оборудования, способного работать с такими незначительными смещениями. Однако с помощью микрометрического винта, входящего в состав установки и позволяющего менять положение зеркала на подложке, можно с достаточной точностью определять смещения относительно какой-либо начальной точки. Тогда, сравнивая получаемые таким образом результаты с результатами, полученными интерферометрическим датчиком, можно заключить, правильно ли работает представленный метод.

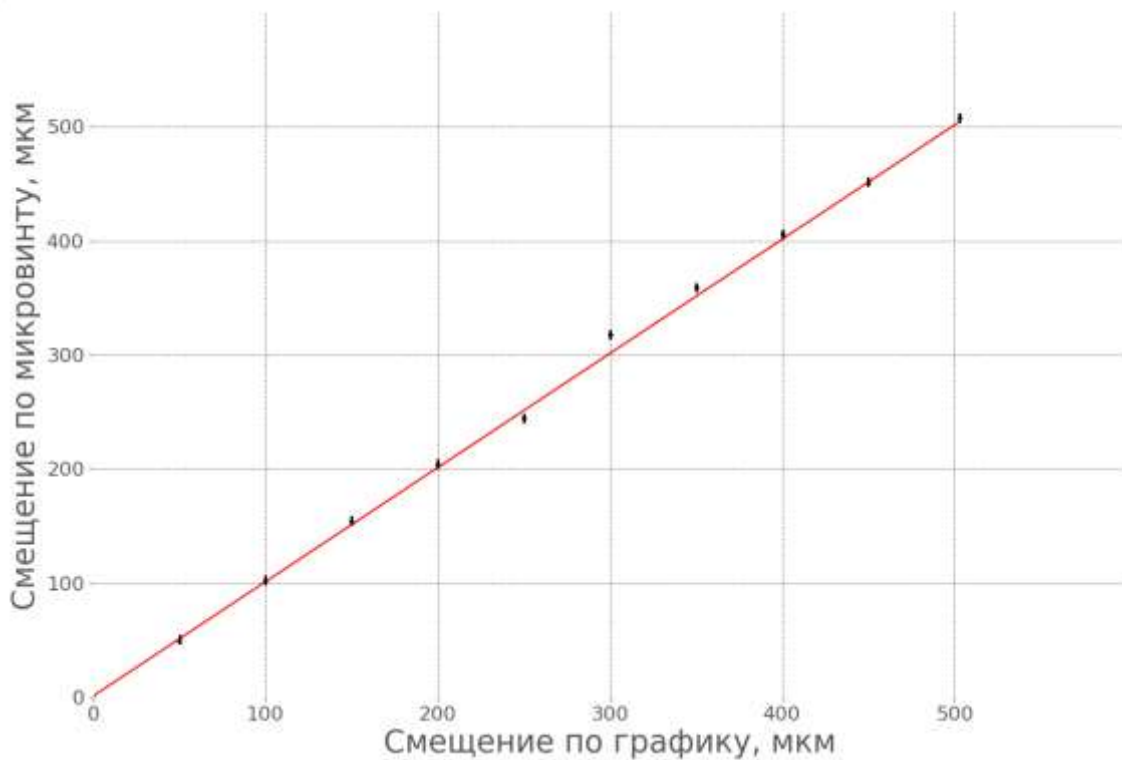


Рисунок 4 – График зависимости  $\Delta x_{гр}(\Delta x_{в})$

На рисунке 4 представлен графика зависимости  $\Delta x_{гр}(\Delta x_{в})$ , где  $\Delta x_{гр}$ - измерения смещений относительно начальной точки с помощью интерферометрического датчика, а  $\Delta x_{в}$ - измерения смещений относительно той же начальной точки, но уже с помощью микрометрического винта. Тангенс угла наклона графика, равный единице, подтверждает, что измерения действительно эквивалентны и рассматриваемый метод является объективным, поэтому его можно применять для измерений абсолютных расстояний.

Теперь оценим предельные возможности предлагаемого метода. В наших экспериментах для проведения измерений использовалось разрешение оптического анализатора  $\delta = 0.4\text{нм}$ , в то время как его предельная разрешающая способность  $\delta_{max} = 0.01\text{нм}$ , что позволяет сделать вывод о том, что максимальное измеряемое расстояние:

$$x_{max} = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{\delta_{max}} \approx 10\text{см}.$$

Однако при таких расстояниях световой пучок на выходе из оптоволокна имеет большую апертуру, вследствие чего только незначительная часть возвращается обратно в волокно после отражения от зеркальной поверхности, из-за чего эффективный коэффициент отражения зеркала становится очень мал. Следовательно, необходимо увеличить мощность излучения, поступаемого в волокно, чтобы детектировать на спектроанализаторе стабильный сигнал даже в случае измерения больших расстояний. Возможным решением для осуществления этого может стать применение более мощных источников, которые при этом обладают достаточно широким спектром. Наиболее перспективным примером такого источника является суперлюминисцентный диод<sup>[2]</sup>,



основанный на явлении суперлюминисценции.

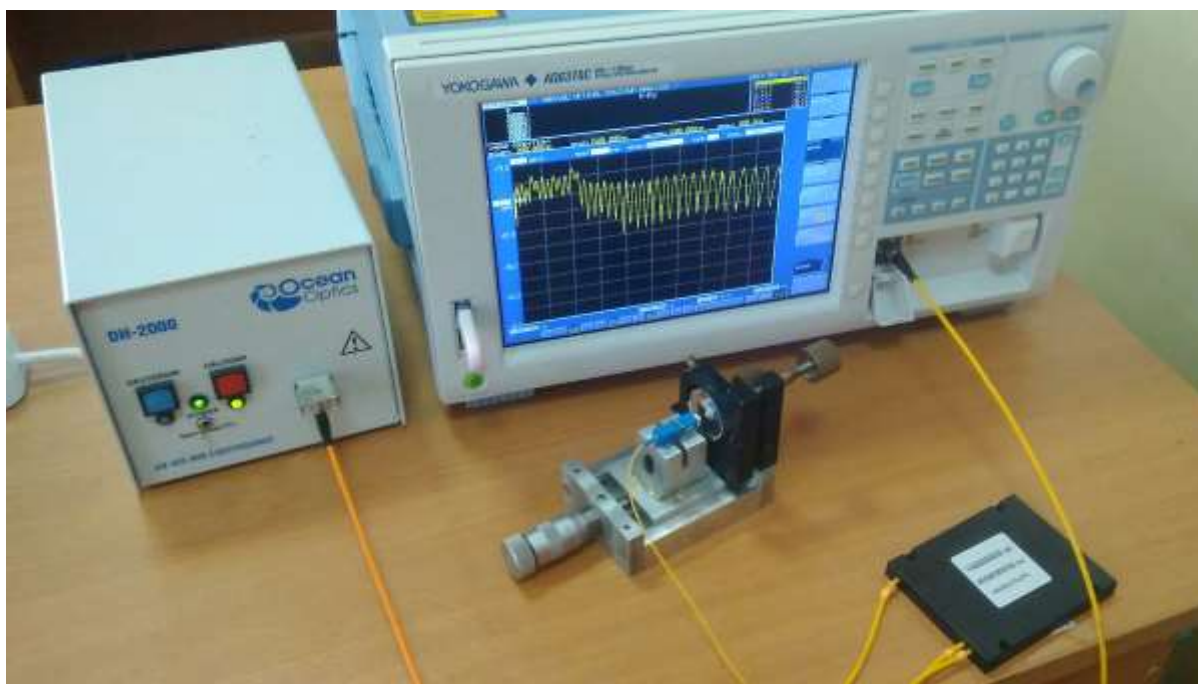


Рисунок 5 – Фотография установки

Таким образом, в ходе работы нами был рассмотрен интерферометрический датчик, позволяющий измерять абсолютные расстояния с точностью порядка микрометра. В конструкции датчика используется оптическое волокно, что позволяет разместить электронику на удалении от измеряемых предметов, которые теперь могут находиться даже в различных агрессивных средах. Эксперименты показали, что предлагаемая система объективно измеряет абсолютные расстояния, а максимальное измеряемое расстояния, согласно оценке, составляет 10 см, однако для этого необходимо несколько улучшить установку.

Литература:

1. Grattan L. S., Meggitt B. T. (ed.). Optical fiber sensor technology: Advanced applications-Bragg gratings and distributed sensors. – Springer Science & Business Media, 2013.
2. Hardy M. T. et al. Superluminescent diodes by crystallographic etching : заяв. пат. 12913638 CIIIA. – 2011.
3. Krohn D. A., MacDougall T., Mendez A. Fiber optic sensors: fundamentals and applications. – Bellingham, WA : Spie Press, 2014.
4. Lee B. H. et al. Interferometric fiber optic sensors //sensors. – 2012. – Т. 12. – №. 3. – С. 2467-2486.
5. Snyder A. W., Love J. Optical waveguide theory. – Springer Science & Business Media, 2012.
6. Zhang Y. et al. High-temperature fiber-optic Fabry–Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser //Optics letters. – 2013. – Т. 38. – №. 22. – С. 4609-4612.