

УДК 681.7.068.4

В. И. Борисов, д-р физ.-мат. наук, доц., Е. М. Силутина, И. В. Шилова**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТЕНЗОДАТЧИК**

Предложена схема волоконно-оптического тензодатчика, позволяющего увеличить чувствительность за счет применения светопоглощающей жидкости между торцами волоконных световодов.

Техническому прогрессу в машиностроении способствовало широкое использование современных методов и средств тензометрии, позволяющих проведение экспериментальных исследований механических напряжений, развиваемых в отдельных узлах машин, что обеспечивает создание высококачественных машин и механизмов. Но традиционные датчики деформаций имеют определенные недостатки, поэтому актуальной является задача поиска новых физических принципов и конструктивных решений для создания тензодатчиков новых типов. Одним из таких типов первичных тензопреобразователей могут служить волоконно-оптические датчики [1-3]. Для оптимизации характеристик волоконно-оптических датчиков используются как новые типы волоконных световодов [4], так и новые конструктивные решения [5, 6].

В работе предлагается конструкция волоконно-оптического тензодатчика для определения деформации растяжения-сжатия, схема которого приведена на рис. 1.

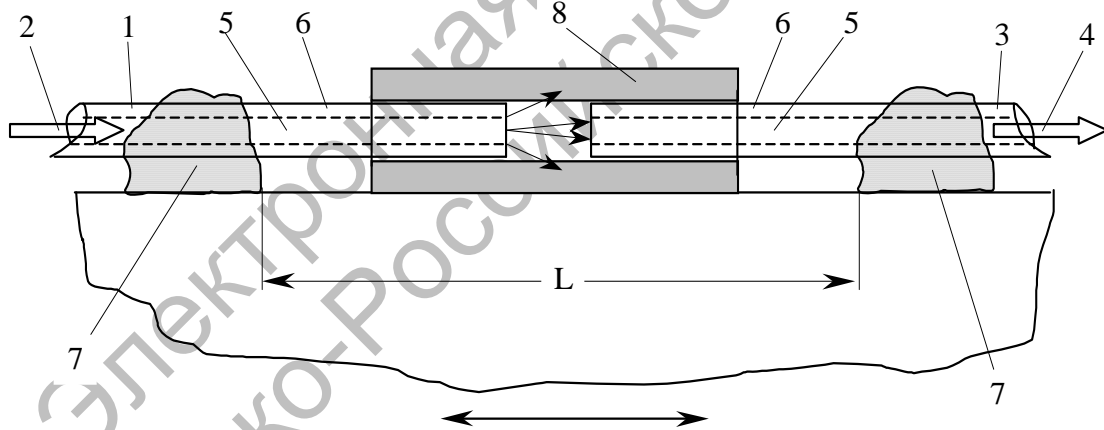


Рис. 1. Схема волоконно-оптического датчика перемещения: 1 – отрезок излучающего световода; 2 – вводимое в световод излучение; 3 – отрезок приемного световода; 4 – излучение, попадающее на фотоприемник; 5 – световедущая сердцевина световода; 6 – оболочка световода; 7 – устройство крепления световода на поверхности объекта контроля; 8 – центрирующая втулка. Стрелка внизу показывает характер деформации объекта

Датчик содержит излучающий отрезок волоконного световода 1, играющий роль источника излучения, в который вводится излучение от полупроводникового лазера или светодиода 2, и приемного волоконного световода 3, который играет роль фотоприемника, с выхода которого излучение 4 регистрируется приемником излучения. Оба отрезка волоконного световода имеют световедущую сердцевину 5 и оболочку 6. Оба отрезка световода закрепляются клеем 7 или другим каким-либо способом на поверхности контролируемого объекта. При этом расстояние между креплениями световода составляет измерительную базу L , значение которой

выбирается из максимального значения деформации растяжения-сжатия конкретного контролируемого объекта. Для того, чтобы оси отрезков волоконных световодов совпадали при изменении расстояния между торцами световодов при изменении деформации, световоды размещаются в свободно располагаемой на поверхности объекта контроля втулке 8, в которой они могут перемещаться. При этом необходимо, чтобы диаметр втулки превышал на несколько микрометров (до десяти) внешний диаметр световодов. Втулка также должна быть изготовлена из материала, который хорошо поглощает распространяемое по световоду излучение.

Принцип работы преобразователя основан на том, что излучение из волновода расходится в апертурном угле и, по мере удаления от излучающего торца световода, энергетическая освещенность будет уменьшаться, и, следовательно, будет уменьшаться регистрируемый сигнал.

Анализ, проведенный для случая использования многомодовых волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления световедущей сердцевины, показывает, что изменение сигнала на выходе датчика $I(x)/I_0$, нормированного на максимальное значение при нулевом расстоянии между торцами излучающего и приемного волоконных световодов, в зависимости от расстояния между торцами излучающего и приемного отрезков световода x будет изменяться по закону

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{r^2}{(r + x \cdot NA)^2}, \quad (1)$$

где I_0 – значение сигнала датчика при отсутствии деформации, когда выходной торец излучающего световода находится в контакте с входным торцом приемного световода; NA – числовая апертура волоконного световода; r – радиус световедущей сердцевины световода.

Так как абсолютные значения деформации растяжения-сжатия при разумных значениях измеряемой базы составляют единицы и сотни микрометров, то для повышения чувствительности тензодатчика, схема которого приведена на рис. 1, в работе предлагается пространство между выходным торцом излучающего световода и входным торцом приемного световода заполнять жидкостью, имеющей высокий показатель поглощения на длине волны излучения, распространяющегося по отрезкам волоконных световодов датчика. Тогда выходной сигнал датчика будет уменьшаться по закону обратных квадратов за счет расходимости излучения, связанной с числовой апертурой световода, как в вышеописанном датчике, но также будет дополнительно уменьшаться по экспоненте за счет поглощения излучения в жидкости при увеличении амплитуды деформации растяжения.

Для такого датчика нормированное на максимум значение выходного сигнала определяется следующим выражением:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{r^2}{(r + x \cdot NA)^2} e^{-kx}, \quad (2)$$

где k – показатель поглощения жидкости.

Результаты расчетов выходного сигнала тензодатчиков без жидкости и с поглощающей жидкостью между торцами световодов в зависимости от расстояния между выходным торцом излучающего световода и входным торцом приемного световода приведены на рис. 2. Расчеты проведены для волоконных световодов с числовой апертурой 0,2 и с разным диаметром световедущей сердцевины и для показателя поглощения жидкости 26 мм^{-1} .

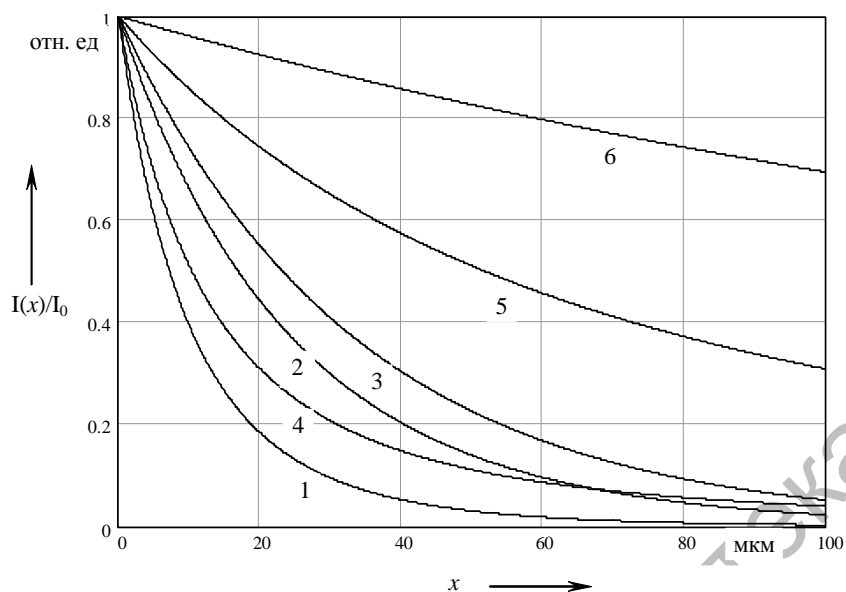


Рис. 2. Зависимости выходного сигнала тензодатчика от расстояния между торцами излучающего и приемного световодов

Кривая 1 соответствует датчику с поглощающей жидкостью на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 10 мкм, кривая 2 – датчику с поглощающей жидкостью на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 50 мкм, а кривая 3 соответствует датчику с поглощающей жидкостью на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 200 мкм.

Кривая 4 соответствует датчику без поглощающей жидкости на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 10 мкм, кривая 5 – датчику без жидкости на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 50 мкм, а кривая 6 соответствует датчику без поглощающей жидкости на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 200 мкм.

Из приведенного рис. 2 видно, что наибольшая чувствительность реализуется на начальном участке зависимостей для тензодатчиков на основе всех толщин световодов как при отсутствии, так и при наличии поглощающей жидкости между световодами. Но для датчика при отсутствии поглощающей жидкости чувствительность заметно отличается в зависимости от толщины световедущей сердцевины волоконных световодов. Так, на участке величины деформаций от 0 до 20 мкм, где наблюдается примерно линейная зависимость, наибольшая чувствительность реализуется для тензодатчика на основе волоконных световодов с диаметром световедущей сердцевины 10 мкм, которая в 2,7 раза выше, чем для датчика на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 50 мкм, и в 9,3 раза выше, чем для датчика на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 200 мкм. Для датчиков на основе световодов с большой толщиной световедущей сердцевины наблюдается практически линейная зависимость выходного сигнала датчика при наибольшей амплитуде деформаций. Таким образом, для построения тензометра с высокой чувствительностью без использования поглощающей жидкости необходимо использовать одномодовые волоконные световоды, так как для них наблюдается больший диапазон изменения сигнала, чем для многомодовых при одинаковой величине амплитуды деформации.

Также можно сделать вывод, что использование поглощающей жидкости приводит к повышению чувствительности датчиков на основе всех рассмотренных

диаметров световедущей сердцевины волоконных световодов. Так, для тензодатчика на основе волоконных световодов с диаметром световедущей сердцевины 10 мкм использование жидкости повышает чувствительность в 1,17 раз, а для датчика на световоде с сердцевиной диаметром 50 мкм – в 2,18 раз. Наибольшее увеличение чувствительности при применении поглощающей жидкости между торцами световодов в 6 раз наблюдается для тензодатчика на основе волоконных световодов с диаметром световедущей сердцевины 200 мкм. Из приведенных зависимостей видно, что чувствительность датчика перемещения на основе световодов с диаметром световедущей сердцевины 10 мкм практически не увеличилась по сравнению с отсутствием поглощающей жидкости между торцами излучающего и приемного световодов датчика, но заметно увеличилась для тензометров на основе многомодовых световодов с диаметром световедущей сердцевины 50 мкм и 200 мкм. При этом относительное увеличение чувствительности по величине больше для датчика на основе световода с диаметром световедущей сердцевины 200 мкм.

В то же время анализ показывает, что при использовании поглощающей жидкости чувствительность датчика увеличивается с уменьшением диаметра световедущей сердцевины световодов, но этот диаметр слабо влияет на чувствительность датчика по сравнению со случаем отсутствия жидкости. Так, чувствительность датчика на основе световода с диаметром сердцевины 10 мкм только 1,46 раз выше чувствительности датчика с сердцевиной 50 мкм и в 1,83 раза выше, чем для датчика на основе световодов с толщиной световедущей сердцевины 200 мкм. Приведенные выше оценки чувствительности характеризуют изменение амплитуды деформации от 0 до 20 мкм.

Таким образом, при построении тензодатчиков с использованием поглощающей жидкости между торцами волоконных световодов необходимо выбирать световоды с большим диаметром световедущей сердцевины.

Экспериментальная работа тензодатчика анализировалась на модели, изготовленной на основе многомодового кварц-полимерного волоконного световода с диаметром световедущей сердцевины 200 мкм и внешним диаметром 500 мкм. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер, генерирующий на длине волны 650 нм. Величина деформации растяжения-сжатия моделировалась перемещением приемного волоконного световода с помощью микрометрического винта. В качестве приемника использовался ваттметр оптический ОМЗ-65. Втулка, центрирующая световоды, выполнена из эбонитовой пластины. В экспериментах применялась поглощающая жидкость с показателем поглощения 26 мм^{-1} на длине волны лазерного используемого излучения. Результаты экспериментальных измерений выходного сигнала датчика $\Phi_{\text{вых}}$ в зависимости от расстояния между излучающим и приемным световодами приведены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что для датчика без поглощающей жидкости наблюдается примерно линейное уменьшение сигнала при увеличении расстояния между торцами излучающего и приемного световодов от 0 до 500 мкм. При этом сигнал уменьшается в 2,6 раза. При использовании поглощающей жидкости наблюдается практически полное уменьшение сигнала датчика от максимального до нуля при изменении расстояния между торцами световодов от 0 до 60 мкм, что свидетельствует о существенном повышении чувствительности датчика. В целом сравнение рассчитанных и измеренных характеристик датчика показывает их качественное соответствие.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для построения оптимальной конструкции высокочувствительного тензодатчика деформации растяжения-сжатия разрывного типа с соосным расположением излучающего и

приемного световодов необходимо использовать волоконные световоды с диаметром световедущей сердцевины в сотни микрометров и применять поглощающую жидкость между торцами излучающего и приемного отрезков световодов.

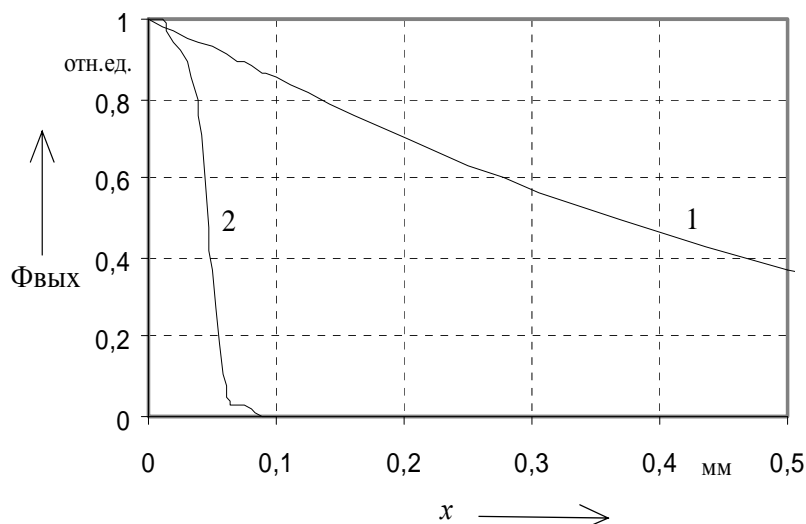


Рис. 3. Экспериментальная зависимость выходного сигнала датчика перемещения от расстояния между торцами световодов: 1 – без поглощающей жидкости между торцами волоконных световодов; 2 – при наличии поглощающей жидкости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окоси, Т.** Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу ; под ред. Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. **Красюк, Б. А.** Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии / Б. А. Красюк, Г. И. Корнеев. – М. : Радио и связь, 1985. – 192 с.
3. **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. **Lim, J. H.** Mach-Zender interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings / J. H. Lim [etc.] // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29, № 4. – P. 346-348.
5. **Donlagic, D.** De la Rosa D. Fiber-optic microbend sensor structure / D. Donlagic, M. Zavrsnik // Opt. Lett. – 1997. – Vol. 22, № 11. – P. 837-839.
6. **Борисов, В. И.** Волоконно-оптический датчик деформации кручения / В. И. Борисов, И. М. Кузменко, Е. М. Силутина // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 2(7). – С. 25-29.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 23.03.2006

V. I. Borisov, E. M. Silutina, I. V. Shilova
Fiber-optic sensor of the deformation
Belarusian-Russian University

The scheme of the fiber-optic sensor of the deformation the sprain-compressions allowing enlarge sensitivity by using absorbent liquid is proposed.