

*“Предложения для предприятий промышленного кластера Самарской области по организации производства сенсоров вектора и величины микроперемещений, действие которых основано на несимметричном распределении интенсивности в сечении высших мод ступенчатых оптических волновод”.*

Актуальность исследований по разработке сенсоров вектора и величины микроперемещений, определяется тем, что использование таких сенсоров позволяет определять не только абсолютную величину деформации объектов, но и ее направление в пространстве, что не имеет аналогов в современной волоконно-оптической датчиковой аппаратуре. В качестве чувствительного элемента таких сенсоров могут использоваться коммерческие световоды для оптической связи со специально структурированными торцами (для структурирования могут применяться технологии двухфотонной полимеризации, фокусированных ионных пучков или традиционная литография).

Действие таких сенсоров основано на несимметричном распределении интенсивности в сечении высших мод ступенчатых оптических волноводов. Деформации световода вызывают изменения показателя преломления, влияние которых на такие моды зависит от взаимной ориентации вектора поперечной деформации и поля поперечной моды. Ступенька высотой  $\lambda/2$ , выполненная на торце световода, при соответствующей поляризации освещающего излучения приводит к преимущественному возбуждению поперечной моды LP-11. Мощность этой моды после прохождения деформированного (например, изогнутого) участка световода меняется по-разному в зависимости от взаимной ориентации ступеньки на входном торце световода и направления изгиба. Чувствительность светового потока в световоде к изгибу максимальна при изгибе в плоскости, перпендикулярной ступеньке на торце и минимальна, если плоскость изгиба параллельна ступеньке на торце.

Если применить волоконно-оптический кабель, состоящий из трех световодов, на торцах которых имеются ступеньки, ориентированные под  $120^\circ$  мы будем иметь разложение вектора поперечной деформации по системе трех векторов. Легко видеть, что при таком разложении вектор поперечной деформации может быть вычислен однозначно. Такой кабель может быть проложен к интересующему нас объекту, а в местах измерения деформаций жестко закреплен на его поверхности. Локализация мест измерения может быть выполнена известными методами рефлектометрии либо путем использования световодов с записанными по длине волоконными решетками. К неоспоримым преимуществам таких сенсоров относятся широкие возможности контроля деформаций в труднодоступных местах, в том числе и агрессивных средах и при наличии электромагнитных и радиационных помех. Погрешность измерений определяется жесткостью крепления световодов к исследуемой поверхности и может быть менее 10%.

Специалистами СГАУ разработаны и реализованы в виде макетного образца волоконно-оптические сенсоры микроизгибов, чувствительные к ориентации плоскости изгиба. Для сенсоров использовалось коммерческое волокно SMF-28. Рабочая длина волны сенсоров 633 нм. Диапазон измеряемых деформаций составил 5 - 70 мкм.

На Рис.1 представлен общий вид устройства, на Рис.2 – расположение световодов со ступеньками на торцах в кабеле, на Рис.3 зависимость светового потока на выходе первого световода от глубины микроизгиба, на Рис.4- зависимость светового потока на выходе второго световода от глубины микроизгиба, на Рис.5 – зависимость светового потока на выходе третьего световода от глубины микроизгиба на Рис.6 – перераспределение световых потоков в световодах в зависимости от направления микроизгиба.

Принцип действия устройства основан на анизотропии полей некоторых поперечных мод световодов. Деформации световода вызывают изменения показателя преломления, влияние которых на такие моды зависит от взаимной ориентации вектора поперечной деформации и поля поперечной

моды. Ступенька высотой  $\lambda/2$ , выполненная на торце маломодового световода, при соответствующей поляризации освещающего излучения приводит к преимущественному возбуждению поперечной моды LP-11. Мощность этой моды после прохождения деформированного (например, изогнутого) участка световода меняется по-разному в зависимости от взаимной ориентации ступеньки на входном торце световода и направления изгиба. В качестве маломодового световода может быть взят одномодовый световод для ближнего ИК-диапазона, освещаемый источником в красной области спектра. На Рис. 3, 4, 5 приведены примеры изменений светового потока на выходе отдельных световодов 1, 2, 3, объединенных в кабель (см. Рис. 2) после прохождения изогнутого участка световодного кабеля в зависимости от глубины изгиба кабеля в плоскости, проходящей через ось кабеля и расположенной под углом  $\alpha_1=20^\circ$  относительно ступеньки на торце световода 1. Для световода 2 плоскость изгиба образует угол  $\alpha_2=40^\circ$  к плоскости ступеньки этого световода. Для световода 3 плоскость изгиба образует угол  $\alpha_3=80^\circ$  к плоскости ступеньки этого световода. Здесь указаны значения острых углов, поскольку для тупых углов  $180^\circ - \alpha$  результат будет аналогичным представленному выше. Это связано с тем, что указанные острый и тупой углы имеют одинаковое по модулю отклонение от нормали к ступеньке на торце световода, и, следовательно, дадут одинаковый результат. Таким образом, чувствительность светового потока в световоде к изгибу максимальна при изгибе в плоскости, перпендикулярной ступеньке на торце и минимальна, если плоскость изгиба параллельна ступеньке на торце. На Рис 6 показано перераспределение световых потоков в световодах в зависимости от направления микроизгиба. Величина изгиба на всех графиках одинакова, меняется лишь ориентация его плоскости в пределах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Угол отсчитывается от плоскости ступеньки на торце световода 1. Световые потоки  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в световодах 1, 2, 3 меняются в соответствии с отмеченной выше закономерностью. Из Рис 6 видно, что каждому значению угла соответствует единственное соотношение между собой световых

потоков  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Отсюда следует, что, вычислив это соотношение, можно однозначно определить угол между плоскостью изгиба и плоскостью ступеньки на торце световода 1. Далее, используя зависимости на Рис. 3 – 5 можно определить и величину изгиба или связанной с ним деформации объекта. По сути, здесь мы имеем разложение вектора поперечной деформации по системе трех векторов, ориентированных относительно друг друга под  $120^\circ$ . Легко видеть, что при таком разложении вектор поперечной деформации может быть вычислен однозначно.

Работает устройство следующим образом: общий источник оптического излучения 1 освещает торцы световодов 3, объединенных в кабель через поляризационные фильтры 2. За счет ступенек на торцах в световодах 3 формируются преимущественно поля поперечных мод LP-11, ориентированные под равными углами друг относительно друга. Это излучение проходит через световод и в месте изгиба под действием объекта 4 частично покидает световод, причем доля света, покинувшего световод различна для разных световодов в кабеле. Далее пучки света, выходя из каждого световода регистрируются отдельными фотоприемниками 5 и после обработки зарегистрированных данных электронным блоком 6 получаем величину и направление деформации световода и, соответственно, связанного с ним объекта 4.

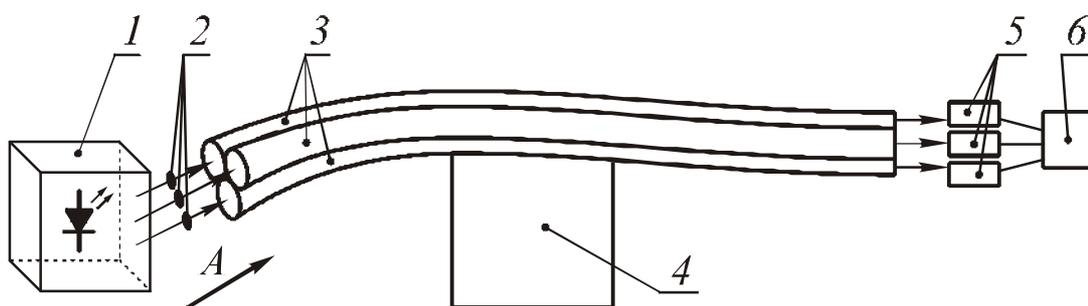


Рис.1 Общий вид устройства.

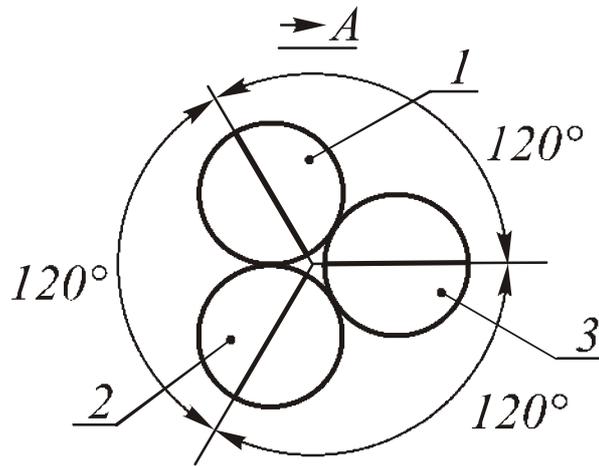


Рис.2 Расположение световодов со ступеньками на торцах в кабеле.

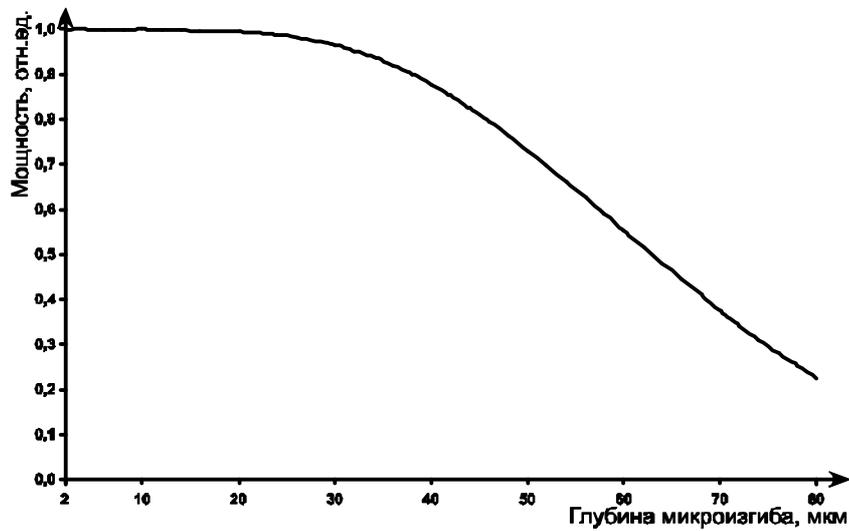


Рис. 3 Световой поток на выходе первого световода в зависимости от глубины микроизгиба.

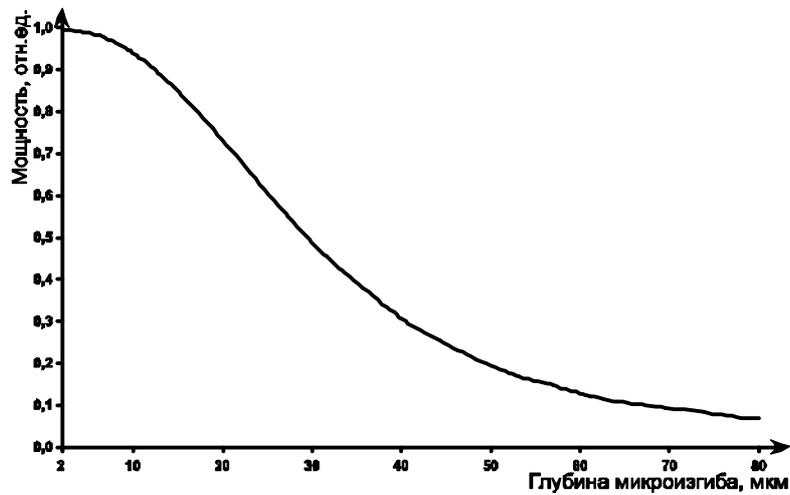


Рис. 4 Световой поток на выходе второго световода в зависимости от глубины микроизгиба

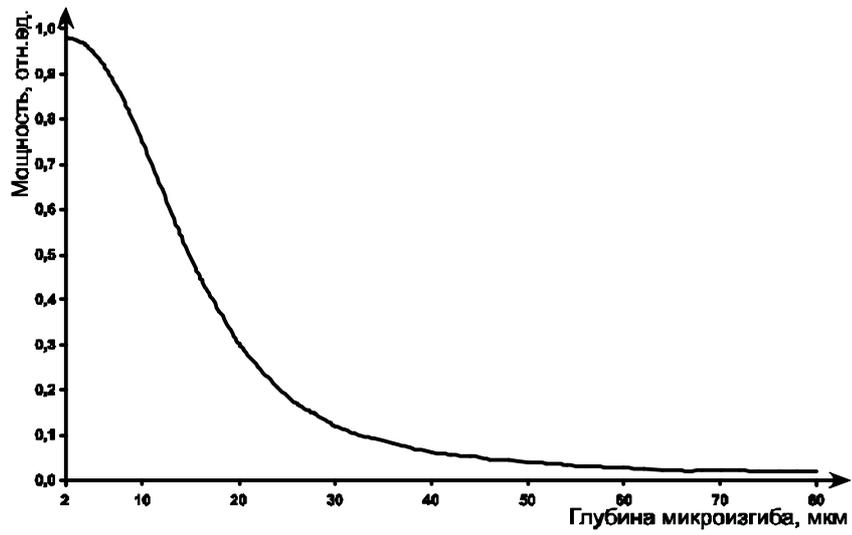


Рис. 5 Световой поток на выходе третьего световода в зависимости от глубины микроизгиба

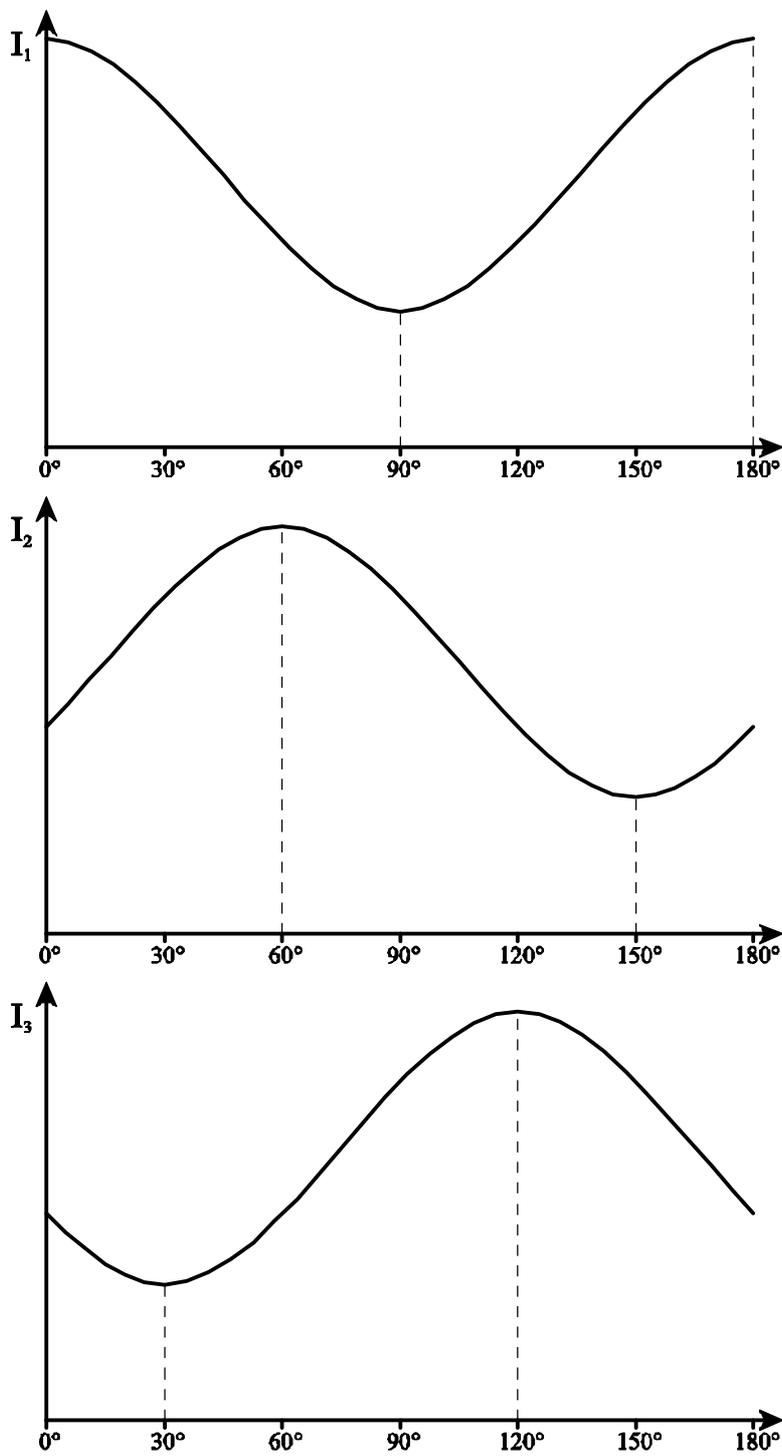


Рис. 6 Перераспределение световых потоков  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в световодах 1, 2, 3 в зависимости от направления микроизгиба

## Публикации

1. Karpeev S.V., Pavelyev V.S., Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Gavrilov A.V., Eropolov V.A. (2007): Fibre sensors based on transverse mode selection. *Journal of Modern Optics*, Vol. 54, P. 833-844
2. Соифер В.А., Карпеев С.В., Павельев В.С., Казанский Н.Л., Гаврилов А.В., Волоконно-оптическое устройство для измерения вектора поперечной деформации, заявка N 2008127125/28(033193), дата подачи заявки 03.07.2008, решение о выдаче патента на изобретение от 29 октября 2009.
3. Карпеев С.В. Анализ и формирование многомодовых лазерных пучков методами дифракционной оптики. М: Радио и связь. 2005.