

Ахтамов У.И., Хасанов М. М. Анализ волоконно-оптических датчиков на основе измерения интенсивности сигнала // Техника юлдузлари.Ташкент,2018.№4, С.29-35.

УДК 621.384.3

Магистрант ФИТ У.И. Ахтамов,  
науч. рук. ст. преп. М. М. Хасанов, ТашГТУ

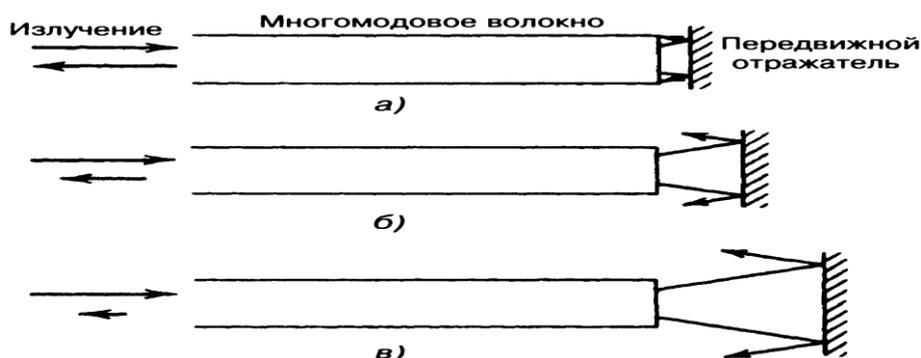
## АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛА

*В статье рассматриваются результаты анализа волоконно-оптических датчиков на основе измерения интенсивности сигнала. Представлены одноволоконный датчик интенсивности с передвижным отражателем, а также дифференциальный датчик интенсивности сигнала. Описаны принцип работы многомодовых интерферометрических волоконно-оптических датчиков, нашедших практическое применение в промышленности и их преимущества по сравнению с существующими аналогами. Показаны различные конструкции датчиков на основе многомодовых волокон, а также приведены принципы реализации одномодовых датчиков Фабри-Перо.*

*Maqolada intensivlikni o'lchash asosidagi tolali-optik datchiklar tahlili natijalari keltirilgan. Harakatchan qaytargichli intensivlik bir modali datchigi hamda intensivlik differensial datchigi batafsil ko'rib chiqilgan. Ishda sanoatda keng tarqalgan multimodali interferometrik tolali-optik datchiklarning ishlash tamoyillari va ularning afzalliklari tavsiflari keltirilgan. Multimodali tolalar asosidagi Fabri-Pero datchiklar turli konstruksiyalari hamda bir modali Fabri-Pero datchiklari qurish tamoyillari ko'rilgan.*

*The article presents the results of the analysis of fiber-optic sensors based on intensity measurements. Considered in detail single-fiber intensity sensor with a movable reflector, as well as a differential intensity sensor. The work describes the principles of operation of multimode interferometric fiber-optic sensors that have found practical application in industry and their advantages. The various designs of Fabry-Perot sensors based on multimode fibers, as well as the principles of the implementation of single-mode Fabry-Perot sensors are considered.*

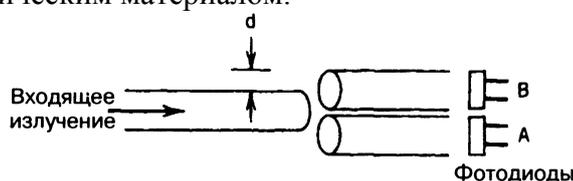
Датчики интенсивности сигнала по своей сути просты, и для них требуется достаточно ограниченный электронный интерфейс. На рис. 1 показано, как работает одноволоконный отражательный датчик сигнала.



**Рис. 1. Схема одноволоконного датчика интенсивности сигнала с передвижным отражателем, измеряющим потери излучения: а- рефлектор, расположенный близко к концу волокна, б и в- отражатели, отодвинутые от конца волокна**

В указанном выше примере свет проходит по волокну слева направо, в конце покидает волокно, расходясь в виде конуса, и попадает на передвижной отражатель. Если рефлектор расположен близко к концу волокна (рис. 1 а), то большая часть излучения отражается обратно в волокно; чем дальше отодвигается отражатель от конца волокна (рис. 1 б и в), тем меньше излучения попадает обратно в волокно. Монотонную связь между расстоянием волокно - отражатель и обратным излучением можно использовать для измерения расстояния [1,2]. Очевидное ограничение такого датчика, общее ограничение для большинства датчиков интенсивности сигнала – это отсутствие подходящего опорного сигнала.

Если изменяется выходной уровень источника света или потери в волокне колеблются в зависимости от времени, то это приведет к ошибочному измерению расстояния. В значительной степени это можно компенсировать, используя больше источников или, как показано на рис. 2, больше волокон. Здесь перемещение, перпендикулярное оси волокна, измеряется посредством двух принимающих волокон, между которыми распределяется излучение из перемещаемого волокна. При соответствующем сочетании фототоков от принимающих волокон можно наблюдать почти линейную связь между перемещением и выходным сигналом. Здесь выходной сигнал менее чувствителен к изменениям амплитуды источника, чем в датчике, показанном на рис. 1. В работе [3] (Lagakos и др.) приведен хороший обзор датчиков перемещения на основе измерения интенсивности. Другая схема с внесением потерь показана на рис. 3. Сила вызывает изменения поляризации, что модулирует амплитуду излучения. Для этого датчика остаются актуальными описанные выше проблемы, связанные с опорным сигналом, а также нелинейность характеристики и гистерезис, обусловленные пьезооптическим материалом.



**Рис. 2. Схема дифференциального датчика интенсивности сигнала: использует одно входное и два выходных волокна**

Один из наиболее популярных методов модуляции интенсивности основан на изгибании волокна, вызывающем потери излучения. Такие датчики микроизгибов используются в тех приложениях, где измеряемый параметр (деформация, давление, сила, положение, ускорение) можно механически преобразовать в перемещение устройства, которое деформирует волокно.



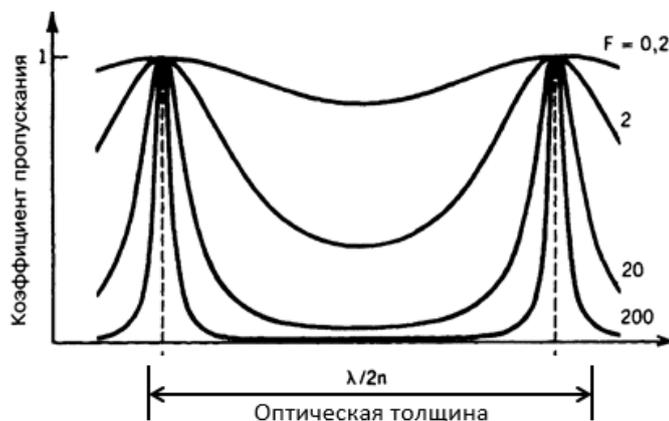
возможностью для разнообразных типов датчиков использовать одну и ту же считывающую оптику.

Многомодовые интерферометрические датчики имеют меньшую чувствительность, чем их одномодовые эквиваленты; но при измерениях в промышленных условиях это часто не является проблемой. Например, многомодовые датчики температуры, выпускаемые MetriCor («МетриКор») [2], имеют разрешение порядка 0,1 °С. Одномодовый интерферометрический датчик температуры десятисантиметровой длины может иметь разрешение 10<sup>-5</sup> °С при использовании значения Хокера (Hocker) для чувствительности волокна к температуре 100 рад °С<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>, если предположить, что чувствительность интерферометра составляет 10<sup>-4</sup> рад. Относительно невысокая чувствительность многомодовых датчиков не имеет принципиального значения, поскольку динамический диапазон всех датчиков с разомкнутым контуром имеет один и тот же порядок величины. В этой ситуации большее, чем необходимо, разрешение только уменьшает эффективный рабочий диапазон датчика. Ограничение динамического диапазона можно преодолеть, если реализовать в устройстве подсчет интерференционных полос или использовать для этого эквивалентный метод. При использовании метода подсчета интерференционных полос, как правило, возникают проблемы, связанные с неопределенностью при считывании, когда внезапно обрывается электропитание, поэтому этот метод невозможно использовать в практических приложениях.

Интерферометры Фабри-Перо состоят из двух отражателей, расположенных с каждой стороны оптически прозрачной среды. Подробный обзор теории этих приборов можно найти в работах [2] (Born и Wolf) и [3] (Hernandez). При соответствующем расстоянии между отражателями коэффициент пропускания интерферометра высок. Изменение расстояния приводит к падению коэффициента пропускания. При высокой отражательной способности соответствующих элементов коэффициента пропускания очень чувствителен к изменениям длины волны или расстояния между отражателями. В целом эффективность интерферометра часто характеризуют добротностью

$$F = 4R / (1 - R)^2,$$

где  $R$  – коэффициент отражения зеркал при отсутствии потерь. Зависимость коэффициента пропускания от расстояния между отражателями для различных значений добротности показана на рис. 5. Интерферометры с высокой добротностью полезны, поскольку позволяют точно определить особенности спектра; интерферометры с низкой добротностью допускают линейный режим в широком диапазоне измеряемого параметра без сложных схем с обратной связью.

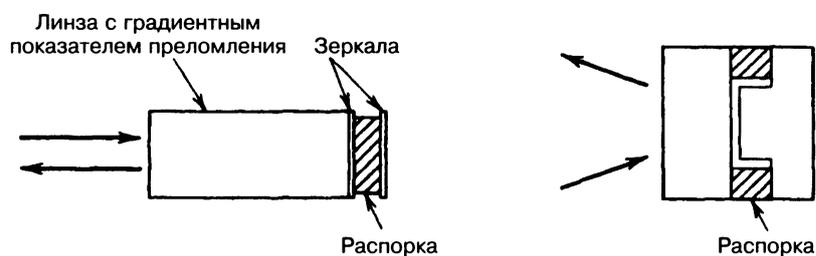


**Рис. 5. Схема отображения коэффициента пропускания интерферометра Фабри-Перо при различных значениях добротности**

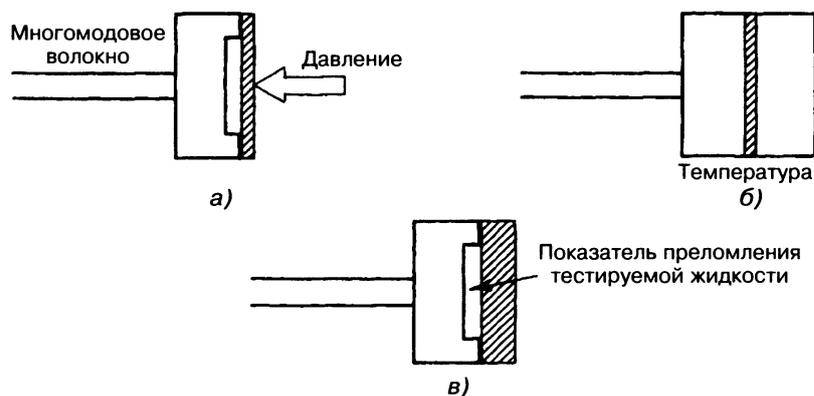
Интерферометры Фабри - Перо привлекательны для использования в датчиках, поскольку позволяют легко установить связь с измеряемыми физическими или химическими величинами. В случае датчика температуры это можно проиллюстрировать, изучив способы изменения температуры, которые могут быть связаны с расстоянием между отражателями интерферометра. В последующем списке каждый пункт представляет собой отдельный оптический параметр, через который можно связать изменение температуры с оптическим резонансом интерферометра: (1) линейное расширение распорного кольца; (2) изменение показателя преломления среды между отражателями; (3) расширение среды между отражателями; (4) изменение кривизны отражателей; (5) изменение поглощения или отражательной способности отражателя и (6) изменение спектрального поглощения или рассеяния в среде между отражателями. К счастью, можно конструировать интерферометры для измерения только одного или двух параметров из перечисленных выше, исключив реакцию на вмешательство остальных. Это позволяет, например, разрабатывать датчики температуры, не чувствительные к давлению [4].

В датчиках Фабри - Перо с многомодовыми волокнами используются различные источники излучения. Как правило, спектральная ширина источника – основной параметр, имеющий значение и обусловленный выбором конкретной схемы считывания. Замкнутый контур считывания допускает использование интерферометров с высокой добротностью и лазерных источников. В этом примере длина волны лазера сопровождает сдвиг резонанса интерферометра. Белые источники света могут использоваться, если в наличии имеется спектрофотометр или его эквиваленты. Светодиоды наиболее распространены и могут применяться с интерферометрами и считывающими устройствами различных конструкций. В некоторых датчиках могут использоваться два источника для уменьшения ошибок, связанных с потерями и неопределенностями в интерферометре [1, 2].

Методы изготовления датчиков различаются в широком диапазоне – от сложной сборки из полированного кварца до осаждения тонкого слоя на конце волокна. Разнообразные конструкции показаны на рис. 6 и 7. На рис. 6 представлены два датчика температуры. Здесь для изменения характеристик интерферометра используется распорка. В схеме на рис. 6 распорка находится в световоде и при изменениях температуры влияет на оптическое расстояние как посредством изменения своей толщины, так и посредством изменения показателя преломления. На рис. 6 показана схема с распоркой (справа), влияющей только на расстояние, благодаря своей способности расширяться.



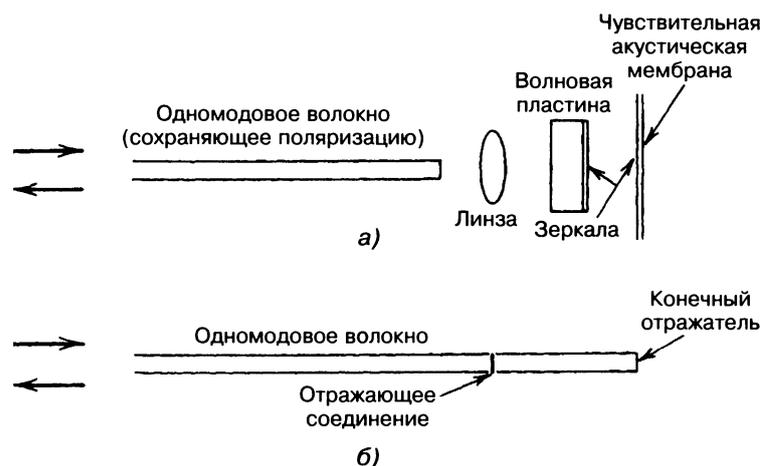
**Рис. 6. Схема датчика температуры, использующего расширение распорки для изменения базы интерферометра**



**Рис. 7. Схемы датчиков Фабри-Перо для измерения: а - давления, б - температуры и в - показателя преломления жидкости**

На рис. 7 представлено семейство датчиков Фабри - Перо. Все эти датчики изготовлены с использованием технологии интегральных схем. Обычно габаритный размер датчика составляет 0,5 x 0,5 x 0,2 мм. Датчики, измеряющие давление, температуру и показатель преломления, – все они работают с одной и той же считывающей оптикой и электроникой.[4]

В одномодовых датчиках Фабри-Перо, как правило, используются лазерные источники, а измерительный интерферометр может быть сформирован внутри самого волокна. Большая длина когерентности лазерного источника делает допустимой некоторую гибкость дизайна, невозможную в случае многомодовых интерферометрических датчиков; однако в целом одномодовые системы конструировать сложнее. На рис. 8 представлены два варианта датчиков, описанных в литературе. В устройстве рис. 8 а используются объемные оптические компоненты и тонкая полимерная мембрана, воспринимающая звук в воздухе. Для сравнения на рис. 8 б показан интерферометр, который образован отрезком одномодового волокна. Рефлекторы встраиваются в виде тонких пленок напыления или вместо этого используется френелевское отражение [3]. В этом внутриволоконном интерферометре для измерения температуры используются эффекты, впервые описанные Хоккером (Hocker) [2].



**Рис. 8. Схемы одномодовых интерферометров: а - датчик давления с внешним чувствительным элементом; б - волоконный датчик температуры**

Интерферометрам Фабри-Перо не требуется сервопривода растяжения волокна или управления эталонным волокном, но они не позволяют использовать намного большую, чем длина когерентности, длину датчика. Если датчики Фабри-Перо с

высокой добротностью применяются в практических приложениях, из-за их нелинейности требуются специальные методы считывания.

Применяются как простые считыватели интенсивности, так и более сложные установки, использующие интерферометр Майкельсона [2]. В этом считывателе длина волны лазера охватывает серию резонансов датчика, фиксируемых в отраженном свете сигнальным фотодиодом. В результате считыватель достигает гибкости спектрофотометра при намного меньшей сложности.

В заключение следует отметить, что в системах считывания объемных интерферометров можно использовать датчики, длина которых несколько больше, чем длина когерентности лазера. Это позволяет формировать множество датчиков различной длины в одном и том же волокне и мультиплексировать считывателем интерферометра. Характерные особенности волокон можно использовать для одновременной регистрации двух поляризаций в приложениях, использующих волокна, поддерживающие поляризацию. Такие волокна позволяют одновременно производить измерения двух связанных параметров, таких как механическое напряжение и температура.

### **Литература**

1. Udd E., William B., Spillman J. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists.// John Wiley & Sons, 2011.- 512 p.
2. Hunsperger R.G. Integrated Optics: Theory and Technology. 6<sup>th</sup> Edition. – Springer Science + Business Media, LLC, 2009.- 525 p.
3. Окуси Т., Окамато К., Оцу М. и др. Волоконно – оптические датчики, - Л. Пер. с японского, 1990.С.194.
4. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно - оптических датчиков // Прикладная фотоника, 2016.Т.3. № 1.С.61-75.