

Федеральное агентство по образованию

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Л. Б. Лиокумович

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 2. Волоконный интерферометрический  
чувствительный элемент**

Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2007

УДК 53.082.54  
ББК 22.34  
Л 60

Рецензенты:

Доктор технических наук, член оптического общества Америки (OSA), директор ООО «Технощит СПб» В. А. Григорьев

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова» М. А. Ероньян

*Л. Б. Лиокумович.* Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 68 с.

Монография посвящена рассмотрению принципов функционирования и актуальным проблемам практической реализации измерительных устройств на базе волоконно-оптических интерферометров.

Во второй части рассмотрены проблемы создания волоконного интерферометрического чувствительного элемента. Анализируется описание чувствительных элементов волоконных интерферометрических датчиков, их параметров, фазовая чувствительность световодов и интерферометров к различным внешним возмущениям, методы создания конструкций чувствительных элементов для волоконных интерферометрических измерителей разных физических величин и параметры, полученные для реальных устройств.

Монография предназначена для студентов и аспирантов, интересующихся вопросами волоконных измерительных устройств и систем, а также для специалистов, разрабатывающих волоконно-оптические датчики или занимающимися вопросами, связанными с интерференционными явлениями в волоконно-оптических устройствах.

Ил. 23. Библиогр.: 28 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Лиокумович Л.Б., 2007

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2007

**ISBN 5-7422-1666-1**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>Часть 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент</b> .....	6
2.1. Интерферометр как чувствительный элемент измерителя физических величин.....	6
2.2. Фазовая чувствительность световода к внешним воздействиям.....	16
2.2.1. Механизмы фазовой модуляции света в оптическом волокне. Фазовая чувствительность свободного световода.....	16
2.2.2. Волоконные преобразователи.....	28
2.3. Фазовая чувствительность волоконного интерферометра к внешнему воздействию.....	34
2.3.1. Фазовая чувствительность двухплечевых волоконных интерферометрических схем.....	34
2.3.2. Фазовая чувствительность одноволоконных интерферометров.....	40
2.3.3. Увеличение длины чувствительных световодов.....	40
2.3.4. Погонная и нормированная фазовые чувствительности интерферометра.....	42
2.4. Принципы построения волоконно-интерферометрических преобразователей.....	44
2.4.1. Разбалансированные и одноволоконные интерферометры.....	43
2.4.2. Схемы с протяженным изолированным опорным плечем	
2.4.3. Двухплечевые конструкции «push-pull» типа.....	51
2.4.4. Фазовая чувствительность реальных волоконно-интерферометрических преобразователей.....	54
2.4.5. Дополнительные требования к преобразователю.....	59
	61
<b>Литература к части 2</b> .....	
	64

## Предисловие

Тематика монографии «Волоконно-оптические интерферометрические измерения» связана с принципами функционирования и наиболее актуальными проблемами практической реализации измерительных устройств на базе волоконно-оптических интерферометров. При рассмотрении волоконно-оптических систем такого типа представляется целесообразным выделить следующие направления, требующие последовательного рассмотрения:

1. Волоконно-оптические интерферометры;
2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент;
3. Регистрация и обработка сигнала волоконных интерферометров;
4. Перспективные направления развития волоконно-оптических интерферометрических систем и измерителей.

Представленная далее вторая часть монографии посвящена проблеме создания волоконного интерферометрического чувствительного элемента и является продолжением рассмотрения волоконно-оптических интерферометрических измерительных устройств, базовые принципы работы которых рассмотрены в первой части.

Чувствительный элемент – один из ключевых узлов измерителя, который определяет его эффективность, частотную характеристику, разрешающую способность. Однако в публикациях по волоконно-оптическим интерферометрическим датчикам можно встретить разные трактовки самого понятия чувствительного элемента, разный подход к введению их параметров, например чувствительности. В обзорной литературе, как правило, методы построения конструкций чувствительных элементов описаны на самом общем уровне, без описания конкретных вариантов реализации. Понять, как создаются

практические измерительные устройства на основе волоконных интерферометров можно по конкретным научным публикациям содержащих описание конкретных разработок датчиков такого типа. Материал данного пособия посвящен обобщенному и систематизированному рассмотрению общих вопросов, связанных с чувствительными элементами волоконных интерферометрических датчиков. Рассматривается роль чувствительных элементов волоконных интерферометрических датчиков, их параметры. Подробно анализируется фазовая чувствительность световодов и интерферометров к различным внешним возмущениям для разных принципов организации конструкции чувствительного элемента. На основе многих литературных данных проведено систематизированное рассмотрение основных применяемых методов создания конструкций чувствительных элементов волоконных интерферометрических для измерения разных физических величин (акустических и гидроакустических волн, вибраций, ускорений). Приведены примеры характеристик получаемых для различных практических вариантов чувствительных элементов.

## Часть 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент

### **2.1. Интерферометр как чувствительный элемент измерителя физических величин**

Согласно общим подходам в метрологии, основой измерителя физической величины является чувствительный элемент, а так же система преобразования данных чувствительного элемента и отображения результата измерений [1, 2]. Чувствительный элемент или датчик преобразует изменения измеряемой величины в сигнал, который может быть обработан и отображен системой преобразования и отображения. В современных измерителях датчик чаще всего выдает сигнал в виде напряжения, линейно связанного с измеряемой величиной.

Для того, чтобы сделать измеритель физических воздействий с применением оптического излучения можно использовать разные явления, приводящие к модуляции измеряемой величиной разных параметров световой волны. В результате воздействий может изменяться амплитуда (интенсивность), фаза, поляризация, спектральный состав распространяющегося либо рассеиваемого света. В интерферометрических устройствах используется влияние внешнего воздействия на фазовую задержку световой волны распространяющейся через участок, подвергнутый этому воздействию.

При использовании волоконных световодов в оптических датчиках они часто выполняют только функцию элементов тракта передачи светового излучения, которые сами по себе не вносят изменений параметров света. В таких конструкциях изменение параметров

распространяющегося света происходит не в световодах, а в дополнительных не волоконных оптических элементах, в местах стыковки волокон и т. п. [3 – 7]. Отдельным перспективным направлением волоконных датчиковых устройств стали системы, в которых чувствительная часть включает непосредственно участок оптического волокна без его разрыва. Такой «безразрывный» волоконный чувствительный элемент привлекателен технологичностью конструкции и тем, что его эффективность можно повышать за счет большой длины волокна при возможности сохранить ограниченные общие габариты благодаря гибкости световода. К такому типу устройств относятся измерители с чувствительным элементом на основе волоконного интерферометра, рассматриваемые в данной работе.

Уникальность применения оптических измерительных интерферометров связана с высокой чувствительностью фазовой задержки света в среде к возмущению среды. Учитывая тот факт, что длина волны света примерно 1 мкм, то такие же по величине изменения оптической длины волокна дают значительные сдвиги фазовой задержки. Фактически наиболее чувствительный к внешним воздействиям параметр излучения в световоде – фаза. А так фаза оптического излучения не регистрируется фотоприемниками, то для измерения фазовых сдвигов световой волны необходим преобразователь, которым является интерферометр.

Рассмотрим измерительный линейный преобразователь некоторого физического сигнала  $V(t)$  на основе волоконного интерферометра. В качестве результирующей величины преобразования будем полагать выходное напряжение  $u(t)$ , пропорциональное измеряемому воздействию. С точки зрения последовательности изменения физических величин, происходящих при формировании выходного

сигнала (напряжения) логично выделить в волоконном интерферометрическом измерителе три стадии преобразования: воздействие – фаза (точнее разность фаз интерферирующих оптических сигналов), фаза – интенсивность, интенсивность – напряжение, как показано на рисунке 2.1.

Свойства первой стадии преобразования (воздействие → фаза) задаются конструкцией, с помощью которой чувствительный участок световода (световодов) расположен в области подвергнутой воздействию. От этой конструкции зависит, как измеряемое воздействие влияет на световоды и изменяет фазовые задержки света в них. Вторая стадия преобразования (разность фаз → интенсивность) это действие интерферометра, в результате которого изменения разности фаз интерферирующих световых волн приводит к изменению интенсивности на выходе схемы (свойства данного преобразования рассмотрены в части 1). И третья стадия преобразования (интенсивность → выходное напряжения) включает действие фотоприемника, но, кроме того, требует специальной системы обработки сигнала, обеспечивающей получение выходного напряжения пропорционального  $\Delta\varphi$ .

Особенность интерферометрических систем состоит в том, что в общем случае, 2-е, и, следовательно, 3-е преобразования не являются линейными (в части 1 подробно рассматривалась связь сигналов  $I(t)$  и  $\Delta\varphi(t)$ , которая не является линейной). Поэтому для создания измерителя необходимы специальные методы приема интерференционного сигнала обычно подразумевающие вспомогательные контролируемые воздействия на разность фаз  $\Delta\varphi$  и специальную обработку сигнала фотоприемника. В связи с этим при анализе измерительного устройства как последовательном действии линейных преобразователей удобно



объединить последние две стадии преобразования в одну (предполагается, что обеспечена линейность такого объединенного преобразования). В результате при описании интерферометрического измерителя обычно подразумевается структура в виде двух линейных преобразователей, рисунок 2.2.

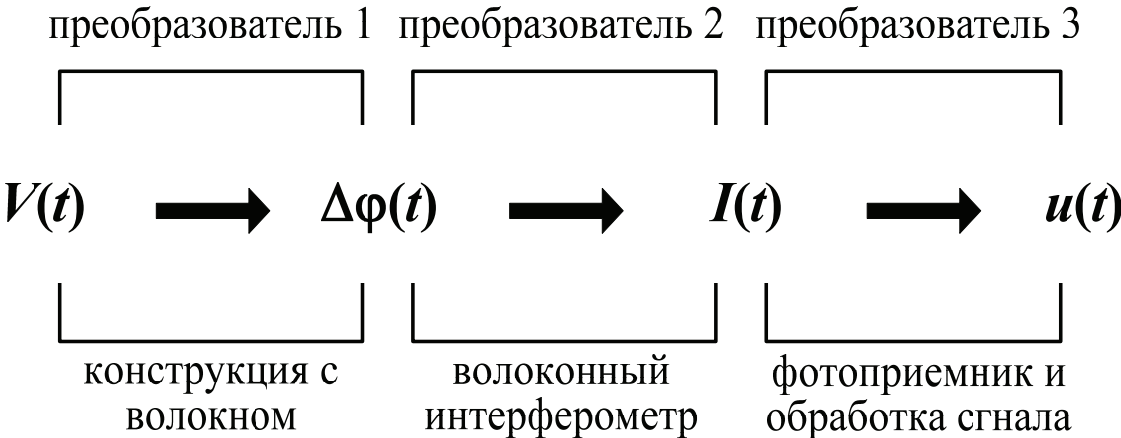


Рисунок 2.1. Преобразование изменений физических в интерферометрическом датчике.

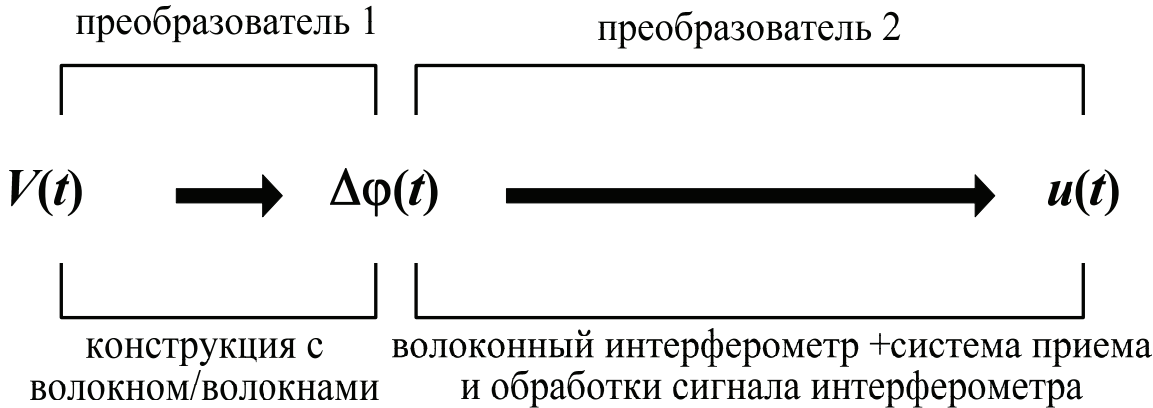


Рисунок 2.2. Две линейных стадии преобразования воздействия в интерферометрическом датчике.

Первый преобразователь – пассивный волоконный преобразователь воздействия, выходным сигналом которого является сигнал  $\Delta\varphi(t)$ .

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_0 + K_V \cdot V(t), \quad (2.1)$$

где  $\varphi_0$  – начальная разность фаз при отсутствии воздействия,  $K_V$  – чувствительность преобразователя (фазовая чувствительность интерферометра к воздействию  $V$ ). Чувствительность  $K_V$  можно записать как отношение приращения разности фаз  $\delta\varphi$  к вызвавшему его приращению воздействия

$$K_V = \frac{\delta\varphi}{\delta V}. \quad (2.2)$$

Этот преобразователь включает в себя сам чувствительный участок (участки) световода и, в общем случае, некоторую пассивную конструкцию, в которую установлен этот участок (участки) волокон интерферометра. Более подробно волоконные фазовые преобразователи для интерферометрических датчиков будут обсуждаться в п.2.2.2 и разделе 2.4.

Второй преобразователь – интерферометрический преобразователь разности фаз интерферирующих лучей. Выходным сигналом измерителя является напряжение

$$u(t) = K_\varphi \Delta\varphi(t), \quad (2.3)$$

где  $K_\varphi$  – чувствительность преобразования разности фаз в выходное напряжение. Этот преобразователь включает в себя волоконный интерферометр, фотодетектор и некоторую систему обработки, либо модуляции и обработки интерференционного сигнала. Чувствительность  $K_\varphi$  так же можно записать в виде отношения приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению разности фаз

$$K_{\varphi} = \frac{\delta u}{\delta \varphi}. \quad (2.4)$$

Методы построения систем преобразования разности фаз  $\Delta\varphi(t)$  в выходной электрический сигнал  $u(t)$  будут рассмотрены в части 3.

Общая чувствительность измерителя  $K = \delta u / \delta V$  определяется произведением чувствительностей  $K_V$  и  $K_{\varphi}$ . Однако для сложного составного преобразования, которое происходит в волоконном интерферометрическом датчике, общая чувствительность фактически не характеризует эффективность и измерительные возможности датчика.

Более показательным параметром является **разрешающая способность**  $\delta V_{min}$  – минимальное детектируемое приращение воздействия. Разрешающую способность можно известным образом выразить через собственный выходной шум измерителя  $u_{ш}$

$$\delta V_{min} = \frac{u_{ш}}{K}. \quad (2.5)$$

На практике, можно полагать, что пассивный волоконный преобразователь не вносит в сигнал  $\Delta\varphi(t)$  собственных шумов и не влияет на собственные выходные шумы всей системы. Собственные шумы датчика связаны с этапом преобразования  $\Delta\varphi(t)$  в  $u(t)$ . Основной вклад в величину  $u_{ш}$  вносят, как правило, шумы активных элементов датчика (оптический источник, фотодетектор, элементы системы обработки). Поэтому оказывается удобно использовать уровень шумов приведенный ко входу второго преобразователя – минимальный детектируемый сдвиг разности фаз интерферирующих лучей, который называют **фазовой разрешающей способностью** интерферометрического датчика

$$\delta\varphi_{min} = \frac{u_{ш}}{K_{\varphi}}. \quad (2.6)$$

Величину  $\delta\varphi_{min}$ , следует рассматривать как параметр именно второго этапа преобразований, независимый от величины  $K_V$ .

Общую разрешающую способность измерителя нетрудно выразить через отношение  $\delta\varphi_{min}$  и  $K_V$

$$\delta V_{min} = \frac{u_{ш}}{K} = \frac{u_{ш}}{(K_V \cdot K_{\varphi})} = \frac{1}{K_V} \cdot \delta\varphi_{min}. \quad (2.7)$$

Из (2.7) наглядно видно, что для улучшения разрешающей способности датчика нужно увеличивать чувствительность волоконного преобразователя  $K_V$  и снижать  $\delta\varphi_{min}$ .

Вследствие сказанного, при исследованиях интерферометрических датчиковых устройств, как правило, фактически независимо рассматривают два основных параметра: фазовую чувствительность интерферометра к воздействию  $K_V$  и фазовую разрешающую способность интерферометрического регистратора (минимально обнаружимое изменение  $\Delta\varphi$ )  $\delta\varphi_{min}$ . Первый параметр относят к эффективности конструкции, в которую установлены волоконный интерферометр, второй параметр характеризует эффективность регистрации разности фаз интерферирующих лучей системой приема и обработки интерференционного сигнала. Принципы построения чувствительных элементов волоконных интерферометрических устройств и вопросы о достигаемой чувствительности к различным воздействиям рассматриваются в данной части работы. Проблемы достижения высокого фазового разрешения в волоконно-оптических интерферометрических измерителях требуют отдельного рассмотрения, в рамках описания принципов обработки интерференционного сигнала

и регистрации колебаний разности фаз интерферирующих волн. Однако отметим, что для эффективных современных систем регистрации сигналов волоконных интерферометров типичные значения фазовой разрешающей способности составляют  $1\text{--}10$  микрорадиан/(Гц)<sup>1/2</sup>.

Тот факт, что система волоконного интерферометрического датчика логично разделяется на две части, повлиял и на применяемую терминологию. Строго говоря, согласно терминологии, принятой в метрологии и по аналогии с другими датчиками физических величин всю систему линейного преобразования от  $V(t)$  до  $u(t)$  следует называть чувствительным элементом измерителя или датчиком. Однако для волоконных интерферометрических устройств обычно под термином «чувствительный элемент» (ЧЭ) подразумевают только ту часть датчика, воздействие на которую влияет на выходной сигнал. В большинстве случаев это непосредственно волокна интерферометра и конструкция, в которой они размещены и которая контактирует с измеряемым воздействием. Это часть связана с первым этапом преобразования. Остальные части датчика, содержащие оптический источник, фотодетектор, нечувствительные к воздействию участки световодов, электронные блоки обработки и т.п. чаще всего пространственно отделены от конструкции с интерферометром и считаются не входящими в чувствительный элемент датчика. Воздействие непосредственно на эти элементы не влияет на показания датчика. Сказанное поясняет рисунок 2.3.

Как уже говорилось, для обеспечения детектирования колебаний  $\Delta\varphi(t)$  по интерференционному сигналу обычно необходимо создание вспомогательной контролируемой фазовой модуляции интерферометрического сигнала. Для этого чаще всего применяют два подхода. Первый – модуляция фазы света в световоде интерферометра,

за счет дополнительного регулируемого возмущения, обычно механического (пьезокерамический или магнестрикционный материал и т.п.). Второй вариант – модуляция частоты (фазы) света излучения на входе интерферометра. Это может быть частотная модуляция источника или фазовая модуляция излучения во входном волокне. Но для применения угловой модуляции входного излучения необходимо использовать разбалансированные интерферометры с достаточной величиной разности хода.

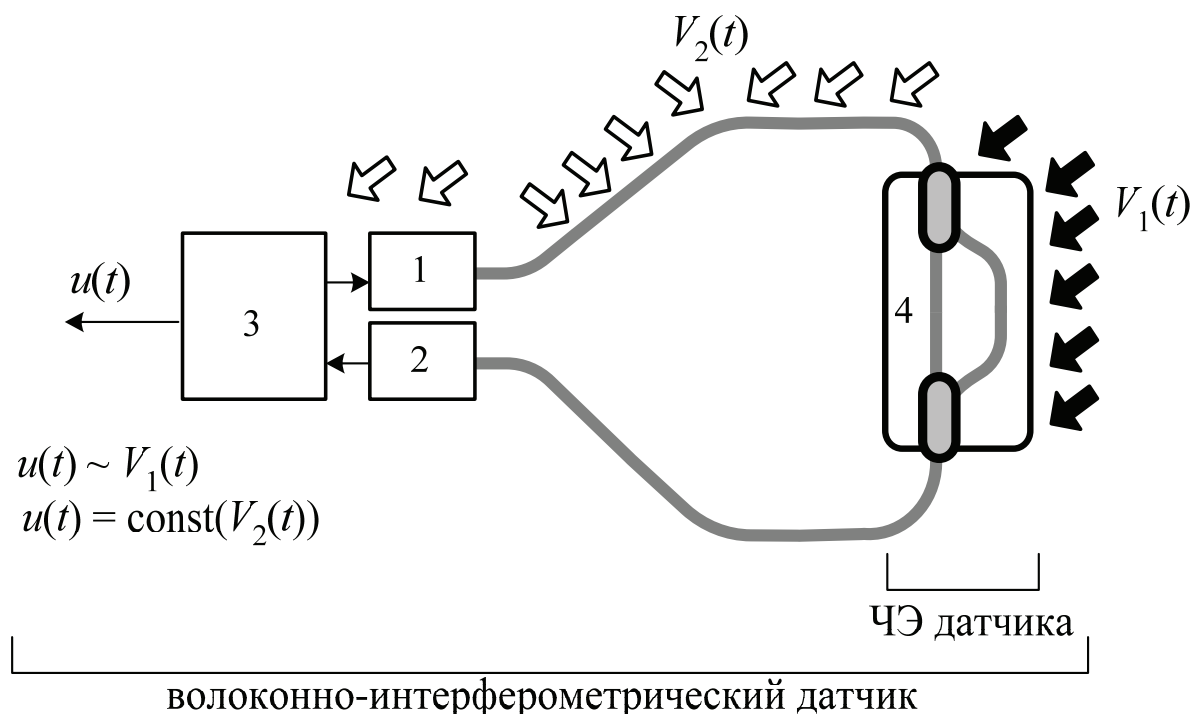


Рисунок 2.3. Структура волоконного интерферометрического датчика.

1 – источник оптического излучения, 2 – фотоприемник, 3 – блок формирования и обработки сигналов, 4 – конструкция с интерферометром.

Конечно реальный волоконный интерферометрический измеритель, как и другие измерители, характеризуется не только чувствительностью

и разрешающей способностью, но целой системой параметров. Это динамический диапазон, АЧХ, нелинейные искажения, погрешность и т.п. общепринятые характеристики измерителей физических величин. Динамический диапазон волоконного интерферометрического датчика обычно зависит от системы регистрации разности фаз. Диапазон изменения величины  $\Delta\varphi$  не приводящий к нелинейным, разрушительным или необратимым деформациям световода обычно значительно выше. Рабочий диапазон частот так же, чаще всего, ограничен системой обработки. Неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне частот, как правило, зависит от конструкции волоконного преобразователя. В целом характеристики волоконного интерферометрического измерителя оказываются взаимосвязаны и определяются параметрами конструкции чувствительного элемента, системы приема и обработки интерференционного сигнала и характеристиками оптоэлектронных элементов, входящих в состав датчика. Вопросы связи характеристик датчика с параметрами конструкции и элементов принципиально важны при разработке и создании практических измерительных устройств. Анализ этих вопросов является одним из основных предметов данной работы.

## 2.2. Фазовая чувствительность световода к внешним воздействиям

С учетом приведенного обсуждения, интерферометрический чувствительный элемент можно рассматривать как волоконный фазовый модулятор (точнее модулятор разности фаз) измеряемым воздействием. Поэтому, прежде всего, необходимо рассмотреть вопрос о модуляции фазы света, распространяющегося по световоду при разных внешних воздействиях на этот световод.

### 2.2.1. Механизмы фазовой модуляции света в оптическом волокне.

#### *Фазовая чувствительность свободного световода*

Рассмотрим участок световода длиной  $l$  подвергнутый воздействию, которое характеризуется параметром  $V$ . Изменение воздействия будем обозначать  $\delta V$ , а приращение фазовой задержки света на этом участке –  $\delta\varphi_c$ , рисунок 2.4. Кроме того, будем подразумевать случай т. н. **«свободного» кварцевого световода** при прямом внешним воздействием (без конструкций осуществляющих дополнительные преобразования рассматриваемых воздействий), а, в предварительном рассмотрении, и без полимерного покрытия.

Фактически при построении интерферометрических датчиков используется два вида прямых воздействий на волокно: тепловые и механические.

Тепловое воздействие описывается относительно несложно через изменение средней температуры участка световода. Механические воздействия более разнообразны и сложны в описании. Это могут быть колебания давления в среде, где расположено волокно, вибрации, ускорения, продольное натяжение волокна, механическое сдавливание или изгиб световода. Могут присутствовать комбинации подобных воздействий. Эти возмущения могут быть как квазистатическими, так и



переменными. При анализе сложного механического возмущения световода обычно рассматривают определенные «базовые» механизмы: изотропное сжатие, продольное растяжение, изгиб, поперечное сжатие.

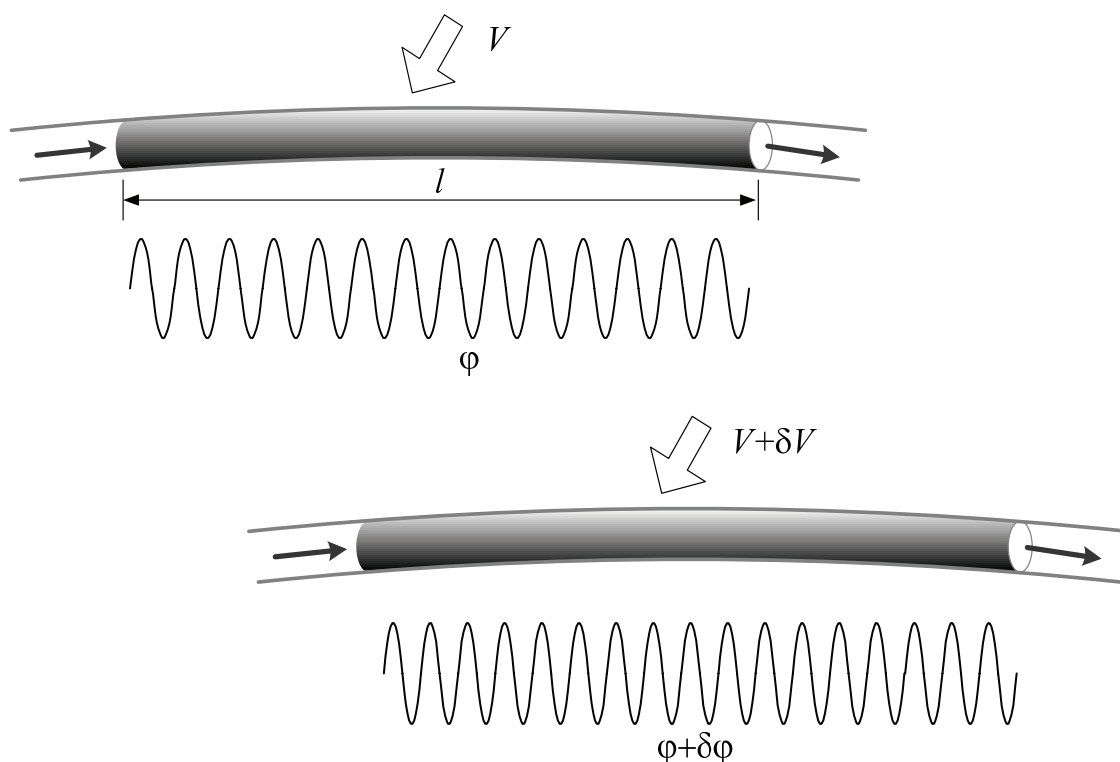


Рисунок 2.4. Приращение фазовой задержки света на участке световода в результате внешнего воздействия на этот участок.

Строго говоря, кроме тепловых и механических воздействий на приращение фазы могут влиять и другие воздействия, например, электромагнитные поля (эффект Погкельса, а так же эффекты Керра, Фарадея). Однако для современных кварцевых световодов фазовые сдвиги, вызванные электромагнитным воздействием, оказываются чрезвычайно малыми и для создания волоконных интерферометрических датчиков электромагнитных полей применяют

дополнительные преобразователи электромагнитных колебаний в механические [4, 8].

Как уже говорилось в части 1, фазовая задержка  $\varphi$  оптического излучения на участке световода длиной  $l$  определяется произведением геометрической длины участка и постоянной распространения:  $\varphi = \beta l$ . Изменение фазовой задержки можно представить выражением

$$\delta\varphi_c = \left( \beta \frac{\partial l}{\partial V} + l \frac{\partial \beta}{\partial V} \right) \delta V. \quad (2.8)$$

Согласно (2.8), при анализе влияния возмущения независимо рассматривают изменение геометрической длины участка и изменение постоянной распространения в результате воздействия. С другой стороны, постоянная распространения связана с эффективным показателем преломления сердцевины волокна  $n$ . С учетом того, что  $\beta = 2\pi n/\lambda$ , приращение фазовой задержки на участке световода можно выразить в виде

$$\delta\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left( n \frac{\partial l}{\partial V} + l \frac{\partial n}{\partial V} \right) \cdot \delta V. \quad (2.9)$$

Отметим, что при заданной длине волны значения  $\beta$  и  $n$  определяются двумя факторами: средним значением показателя преломления материала сердцевины  $n_c$  (материальный фактор) и поправкой, связанной с поперечными геометрическими параметрами световода, прежде всего диаметром сердцевины (волноводный фактор). Для рабочих длин волн световода эффективный показатель преломления находится в диапазоне  $n_0 < n < n_c$ . Вследствие воздействия на световод может меняться как средняя величина показателя преломления сердцевины, так и поперечная геометрия световода. Поэтому часто в рассмотрении влияния воздействия на фазовую задержку световода

анализируют три составляющих, поскольку первое слагаемое в (2.8) и (2.9) разделяют на два. При этом отдельно записывают вклад от изменения средней величины коэффициента преломления материала и вклад от изменения диаметра сердцевины. Однако, учитывая, что отличие  $n_0$  и  $n_c$ , составляет менее 1%, в большинстве случаев влияние изменения диаметра сердцевины пренебрежимо мало по сравнению с изменением коэффициента преломления материала [4, 8]. Поэтому приращение фазовой задержки на участке световода можно описывать выражением (2.9), но в коэффициенте  $\delta n/\delta V$  учитывать только изменение средней величины показателя преломления материала сердцевины  $\delta n/\delta V \approx \delta n_c/\delta V$ .

Характеристикой эффективности влияния воздействия является чувствительность фазовой задержки оптического волокна (**фазовая чувствительность световода**) к данному воздействию

$$k_V = \frac{\delta \varphi_c}{\delta V}. \quad (2.10)$$

Отличие от чувствительности (2.2) заключается в том, что  $k_V$  характеризует приращение фазовой задержки участка световода, а не разности фаз интерферирующих лучей.

Как правило, результат изменения фазовой задержки участка, подвергнутого воздействию, увеличивается при увеличении длины этого участка, т.к. результирующее приращение  $\delta \varphi_c$  складывается из приращений на отдельных сегментах световода. Поэтому для унифицированного описания и сравнения чувствительности к воздействиям используется **погонная фазовая чувствительность**

$$k'_V = \frac{\delta \varphi_c}{l \cdot \delta V}. \quad (2.11)$$

**Тепловое воздействие.** Рассмотрим фазовую чувствительность участка световода к изменению температуры этого участка  $\delta T$ . В этом случае погонная чувствительность задается выражением

$$k'_T = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot \delta T}. \quad (2.12)$$

С учетом продольного расширения и изменения показателя преломления (термооптический эффект) можно представить сдвиг фазовой задержки выражением

$$\delta\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left( n \frac{\partial l}{\partial T} + l \frac{\partial n}{\partial T} \right) \cdot \delta T = \frac{2\pi \cdot l}{\lambda} \cdot \left( \frac{n}{l} \frac{\partial l}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial T} \right) \cdot \delta T. \quad (2.13)$$

Множитель в скобках представляет собой приращение оптической длины световода. Первое слагаемое – вклад от геометрического удлинения, второе – вклад изменения показателя преломления.

Типовое значение коэффициента погонного приращения  $\partial l / \partial T$  для кварцевых световодов составляет примерно  $10^{-7}$   $1/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , а значения коэффициента  $\partial n / \partial T$  для волоконных световодов составляют  $(0,6 \div 2) \cdot 10^{-5}$   $1/^\circ\text{C}$  [4, 8]. Таким образом, вклад от температурного изменения показателя преломления является основным

$$k'_T = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot \delta T} \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) \quad (2.14)$$

Если для оценки коэффициента  $\partial n / \partial T$  взять значение  $10^{-5}$ , то для длины волны 0,63 мкм и 1,5 мкм получим соответственно

$$k'_T|_{\lambda=0,63} \approx 100 \text{ [рад}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})], \quad k'_T|_{\lambda=1,5} \approx 40 \text{ [рад}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})]. \quad (2.15)$$

Обычные полимерные покрытия слабо влияют на фазовую чувствительность к температуре. Однако за счет специального подбора

многослойных покрытий можно значительно менять величину и даже знак фазовой чувствительности световода к температуре [3, 4, 9, 10].

**Продольное растяжение.** Рассмотрим изменение фазовой задержки излучения на участке световода при механическом продольном растяжении этого участка  $\delta l$ , рисунок 2.5. В данном случае фазовая чувствительность задается выражением

$$k'_l = \frac{\delta\varphi_c}{\delta l}. \quad (2.16)$$

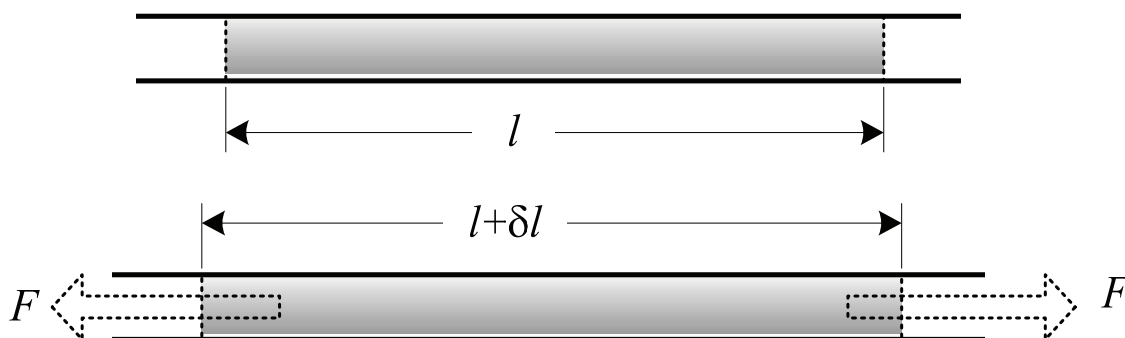


Рисунок 2.5. Продольное растяжение участка световода.

Согласно общему представлению (2.9), приращение фазовой задержки можно записать в виде

$$\delta\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left( l \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial l}{\partial l} \right) \delta l = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \left( \frac{l}{n} \frac{\partial n}{\partial l} + 1 \right) \cdot \delta l. \quad (2.17)$$

Величина приращения показателя преломления вследствие фотоупругого эффекта описывается выражением [4, 7, 10]

$$\frac{\partial n}{\partial l} = -\frac{n^3}{2l}(p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})), \quad (2.18)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $p_{11}$  и  $p_{12}$  – компоненты фотоупругого тензора материала световода. Подставив (2.18) в (2.17), фазовую чувствительность к продольному растяжению можно записать в виде

$$k_l = \frac{\delta\varphi_c}{\delta l} = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \left(1 - \frac{n^2}{2}(p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12}))\right). \quad (2.19)$$

Учитывая типовые значения механических параметров для плавленого кварца [4, 7, 9, 10]  $\mu = 0.17$ ,  $p_{11} = 0.12$ ,  $p_{12} = 0.27$ , множитель в скобках составляет примерно 0,8. Таким образом, при растяжении волокна геометрическая длина увеличивается, а показатель преломления уменьшается. То есть фотоупругий эффект частично компенсирует вклад геометрического удлинения. Для оценки фазовой чувствительности окончательно получаем

$$k_l = \frac{\delta\varphi_c}{\delta l} \approx 0,8 \cdot \frac{2\pi n}{\lambda}. \quad (2.20)$$

В случае длин волн 0,63 мкм и 1,5 мкм получим соответственно

$$k_l|_{\lambda=0,63} \approx 12, \quad k_l|_{\lambda=1,5} \approx 5 \quad [\text{рад/мкм}]. \quad (2.21)$$

При анализе растяжения световода часто используют относительную величину геометрического удлинения  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l}. \quad (2.22)$$

Значение  $\varepsilon$  указывают в стрейнах (strain), эта безразмерная единица подчеркивает, что приведено относительное изменение геометрического размера. Очевидно, что для заданного относительного удлинения приращение фазовой задержки будет пропорционально длине

растягиваемого участка и удобно использовать погонную чувствительность. С учетом (2.20) и (2.21) получим

$$k'_\varepsilon = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot \varepsilon} \approx 0,8 \cdot \frac{2\pi n}{\lambda}. \quad (2.23)$$

Для длин волн 0,63 мкм и 1,5 мкм

$$k'_\varepsilon|_{\lambda=0,63} \approx 12, \quad k'_\varepsilon|_{\lambda=1,5} \approx 5 \quad [\text{рад}/(\text{мкстрейн} \cdot \text{м})]. \quad (2.24)$$

Продольное удлинение волокна связано с некоторой растягивающей силой  $F$ , приложенной к удлиненному участку. Поэтому часто удобно рассматривать действие натяжения через растягивающее усилие. Для того чтобы вызвать относительное удлинение световода  $\varepsilon$ , необходима сила, равная

$$F = \pi r^2 E \varepsilon, \quad (2.25)$$

где  $r$  – радиус волокна (для стандартных волокон  $r = 62,5$  мкм),  $E$  – модуль Юнга световода, который для кварцевых волокон составляет примерно  $7,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. С учетом (2.24) и (2.25) получим

$$k'_F = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot F} = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot \varepsilon} \cdot \frac{1}{\pi r^2 E} \approx 10^{-3} \cdot \frac{2\pi n}{\lambda}. \quad (2.26)$$

Для длин волн 0,63 мкм и 1,5 мкм

$$k'_F|_{\lambda=0,63} \approx 1,5 \cdot 10^{-2}, \quad k'_F|_{\lambda=1,5} \approx 6 \cdot 10^{-3} \quad [\text{рад}/(\text{Н} \cdot \text{м})]. \quad (2.27)$$

**Изотропное давление.** Погонная фазовая чувствительность участка световода, находящегося в упругой среде, к изотропному давлению записывается в виде

$$k'_p = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot \delta p}, \quad (2.28)$$

где  $\delta p$  – изменение давления в среде в области световода.

При идеализированном рассмотрении действия изотропного давления на свободный световод без покрытий наиболее адекватной считается т.н. «гидростатическая» модель [4], согласно которой участок световода под давлением сжимается и укорачивается как жесткий стержень. В соответствии с данной моделью оценка погонной фазовой чувствительности к изотропному давлению составляет

$$k'_p = \frac{\delta\varphi_c}{l \cdot \delta p} = -\frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \frac{(1-2\mu)}{E} \cdot \left(1 - \frac{n^2}{2}(p_{11} + 2p_{12})\right), \quad (2.29)$$

где  $E$  – модуль Юнга (для плавленого кварца  $E \approx 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>). В случае длин волн 0,63 мкм и 1,5 мкм получим соответственно оценочные значения

$$k'_p|_{\lambda=0,63} \approx -3 \cdot 10^{-5} \text{ и } k'_p|_{\lambda=1,5} \approx -1 \cdot 10^{-5} \text{ [рад/(Па}\cdot\text{м)]}. \quad (2.30)$$

Несмотря на экспериментально подтвержденную адекватность гидростатической модели, выражение (2.29) и приведенные оценки (2.30) могут оказаться значительно занижены по сравнению с чувствительностью реальных волокон. Это связано с тем, что модель предполагает определенные идеализированные условия приложения изотропного давления среды на прямолинейный кварцевый световод без покрытий. В реальной ситуации практически всегда происходит более сложный комплекс явлений. На действие сдавливания и на фазовую чувствительность может в большей или в меньшей степени влиять конфигурация расположения световода. Колебания изотропного давления, как адиабатический процесс вызывают колебания температуры и оказывают тепловые воздействия. Поскольку исходная чувствительность (2.30) к изотропному сжатию очень мала, то такие факторы могут давать заметный вклад в фактическую чувствительность.



С другой стороны их влияние зависит от среды, в которой находится световод, и скорости изменения давления.

Значительным фактором повышения фазовой чувствительности к изотропному давлению на световод является наличие у реальных волокон полимерной оболочки. Как показали теоретические и экспериментальные исследования [4, 10], в зависимости от материала и толщины покрытия световода  $k'_p$  может значительно увеличиваться или уменьшаться. Покрытия с меньшей жесткостью, чем кварцевая часть световода увеличивают чувствительность. При этом  $k'_p$  растет с увеличением диаметра покрытия. Сущность эффекта связана с тем, что сжимающее усилие создаваемое на увеличенной площади взаимодействия эффективно преобразуется в продольное растяжение внутренней жесткой стеклянной жилы, и преимущественно работает более сильный механизм фазовой модуляции. В результате использования подобных покрытий из полиэтилена, нейлона и т.п. материалов с увеличенными до нескольких миллиметров диаметрами удается получать чувствительность к давлению почти на два порядка выше, чем оценка (2.30). Аналогичным образом, применяя более жесткие, чем световод покрытия, например, металлические, можно добиться снижения величины  $k'_p$ .

Кроме перечисленных характерных типов воздействий, на практике представляет интерес фазовая чувствительность световодов и к другим видам механических воздействий, например к изгибам, вибрации, механическому не изотропному сжатию (например, сжатию световода между двумя плоскими пластинами), скрутке и т.п. К сожалению воздействия подобного рода более сложны для обобщенного изучения. Возникающий комплекс явлений (включая и рассмотренные выше) и их

результатирующее действие в существенной мере зависит от конкретного способа осуществления воздействия.

Приведенные выше оценки подразумевают квазистатические воздействия. В случае переменных возмущений световода чувствительность может значительно меняться в зависимости от частоты. При этом процессы формирования изменения фазовой задержки непосредственно локального участка световода обладают очень малой инерционностью за счет малых поперечных размеров световода. Поэтому в реальных устройствах инерционность и ограничение частотного диапазона определяется не самим волокном, а покрытиями световода и характером расположения и крепления световода в среде с внешним воздействием, соотношением длины чувствительного участка волокна с длиной волны возмущающего колебания в среде. Как правило, частотная зависимость чувствительности оказывается неравномерной, ее вид и неравномерность может существенно меняться при изменениях длины и формы расположения световода, способов закрепления световода

К приведенному рассмотрению фазовой чувствительности свободного световода можно добавить некоторые дополнительные замечания.

Основным рассматриваемым вопросом являлось изменение фазовой задержки излучения в одномодовом световоде. Но такая постановка вопроса подходит не всегда. Например, при применении в волоконных интерферометрических датчиках ДЛП световодов, не менее важным может быть вопрос об изменении разности фаз поляризационных мод. Для многомодовых или межмодовых интерферометров, когда применяется многомодовое волокно вопросы «фазовой

чувствительности» так же имеют особенности, связанные с многомодовым характером распространения излучения.

Оптическое волокно выпускается с первичным покрытием, жестко связанным с оболочкой световода. Параметры покрытия и количество разнородных слоев бывает разным. Это не влияет отрицательно на свойства передачи сигналов, однако, как было рассмотрено выше, может заметно повлиять на фазовую чувствительность световода к воздействию. Еще более существенное влияние на фазовую чувствительность световода к воздействию могут оказать специализированные покрытия световода, которые наносят для дополнительной защиты световода.

На практике протяженный световод, размещенный во внешней среде, обычно имеет ту или иную кабельную заделку. Это значит, что используются дополнительные покрытия волокна с воздушными промежутками, гелями, силовыми элементами и т.п. Очевидно, что кабельная заделка может приводить к значительным отличиям от случая свободного световода.

Все эти отличия от идеализированного случая «свободного световода» приводят к тому, что при тепловых воздействиях может появиться дополнительная инерционность. Для механических воздействий может существенно меняться величина чувствительности и частотная характеристика.

Завершая обзорное рассмотрение фазовой чувствительности свободного волоконного световода можно заключить, что влияние теплового воздействия слабо зависит от внешнего (по отношению к волокну) преобразователя, и существенно регулируется первичным покрытием. В целом чувствительность к изменениям температуры высокая, что хорошо для регистрации пульсаций температуры, но

создает проблему для регистрации других воздействий такого же частотного диапазона, как и флуктуации температуры. Так же высокая температурная чувствительность является источником проблемы неконтролируемого дрейфа рабочей точки на передаточной характеристике интерферометра.

Для механических воздействий одним из самых эффективных механизмов модуляции фазовой задержки является продольное растяжение. Поэтому в датчиках различных физических воздействий часто стараются обеспечить такую конструкцию чувствительного элемента, чтобы внешнее воздействие вызывало растяжение световодов интерферометра.

### ***2.2.2. Волоконные преобразователи***

Измеритель, в котором чувствительное волокно свободно находится в среде с воздействиями, встречается фактически только в лабораторных экспериментальных установках. При разработке практических макетов датчиков волокно закрепляется посредством некоторой конструкции. Даже в простейших вариантах такая конструкция начинает играть роль механического **волоконного преобразователя**, который влияет на то, как внешнее воздействие в среде вызывает изменение фазовой задержки света в волокне. Более того, при создании волоконных чувствительных элементов разрабатывают и используют специальные конструкции, обеспечивающие максимально эффективное преобразование внешнего воздействия в сдвиг фазовой задержки. При применении конструкции-преобразователя фазовая чувствительность волокна к воздействию будет отличаться от чувствительности свободного световода, и в значительной степени определяться преобразователем.

При практических разработках различных волоконных преобразователей для датчиков на основе волоконных интерферометров надо принимать во внимание, что конструкция чувствительного элемента одновременно выполняет разнообразные функции и влияет на разные качества чувствительного элемента.

С одной стороны, конструкция волоконного преобразователя обеспечивает прохождение физико-механических процессов нужного типа. С этой точки зрения можно выделить ряд факторов действия преобразователя.

– Волоконный преобразователь должен обеспечить эффективное подведение измеряемого сигнала внешнего воздействия к световоду. Кроме того, конструкция преобразователя должна обеспечить определенный механизм модуляции фазовой задержки световода, эффективный для данного датчика. Например, в датчиках механических воздействий, как правило, создают конструкции, в которых измеряемое внешнее воздействие вызывает продольное растяжение световода.

– Во многих случаях переменных механических воздействий, преобразователь осуществляет трансформирующее действие, что позволяет согласовать механические параметры измеряемых колебаний внешней среды и световода.

– В ряде случаев, конструкция волоконного преобразователя должна осуществлять промежуточное преобразование. Так, например, в датчиках электромагнитного поля волоконный преобразователь содержит элемент, преобразующий электромагнитные колебания в механические деформации (подложка или покрытие из магнитострикционного или пьезокерамического материала), либо в тепло и т.п.

– В волоконных интерферометрических датчиках с вспомогательным модулирующим воздействием на интерферометр, конструкция чувствительного элемента должна предусматривать создание такого дополнительного модулирующего воздействия.

– По возможности, конструкция преобразователя должна обеспечивать снижение влияние на чувствительные волокна различных «паразитных» внешних воздействий, присутствующих в среде одновременно с измеряемым воздействием.

С другой стороны, конструкция волоконного преобразователя должна обеспечить определенную конфигурацию расположения световодов интерферометра. Так же необходимо совместить требования к желаемым внешним габаритам чувствительного элемента и протяженностью световодов интерферометра. К самым распространенным конфигурациям световодов в чувствительном элементе волоконных интерферометрических датчиков являются линейное расположение, планарная сеть, намотка в катушку [6].

Линейный участок волокна (рисунок 2.6, а), как правило, подразумевает большую протяженность чувствительного элемента, поскольку световоды интерферометра обычно имеют длину от единиц до сотен метров. Вообще говоря, волокно может быть проложено по определенной траектории не являющейся строго линейной. На показания датчика будет влиять интегральное значение величины воздействия вдоль длины чувствительного световода. Для расположения чувствительного волокна на планарной поверхности используют принцип планарной сети, рисунок 2.6, б.

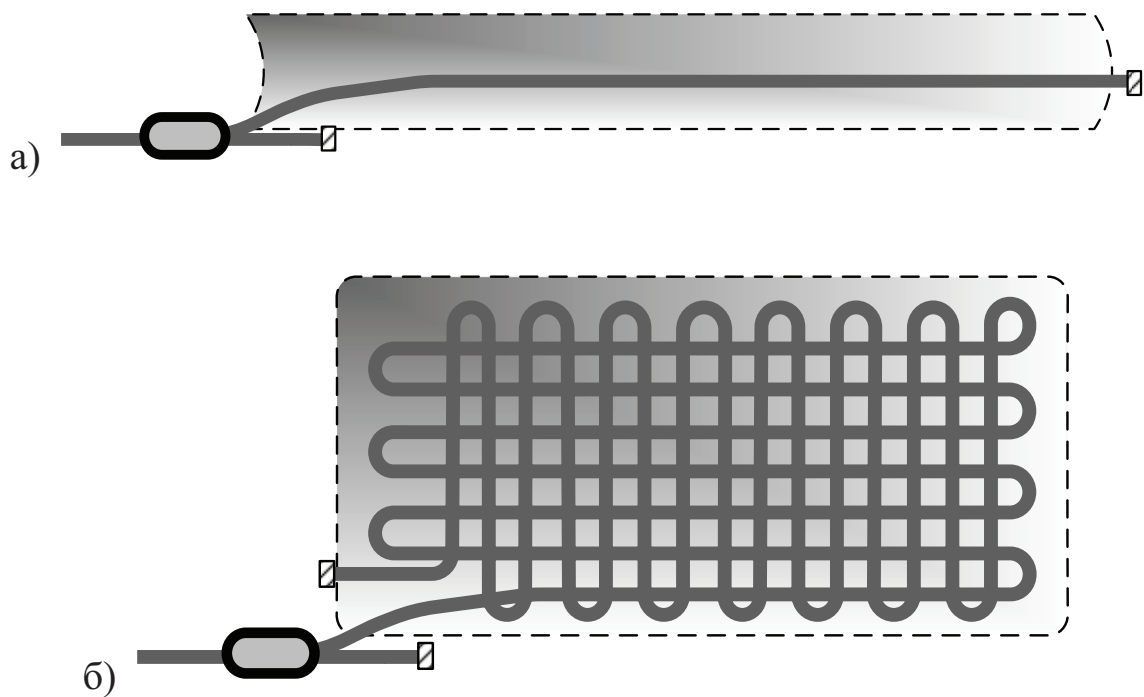


Рисунок 2.6. Планарные конфигурации волоконного чувствительного элемента, а) – линейный чувствительный световод, б) – планарная сеть.

Отметим, что линейная или планарная конфигурация световодов в чувствительном элементе интерферометрического датчика не означает отсутствие преобразователя. Само механическая основание, к которому крепится волокно, способ крепления и другие конструктивные элементы реального датчика будут явно или неявно создавать механический преобразователь, в той или иной степени выполнять функции преобразователя и, в конечном счете, влиять на фазовую чувствительность интерферометра. В случае планарной конфигурации возможно применение специальных дополнительных конструкций преобразователя для преобразования измеряемого воздействия в растягивающее усилие, поперечное сжатие и т.п.

Для уменьшения габаритов чувствительного элемента и локализации области регистрации воздействия световоды интерферометра сматывают в катушку, рисунок 2.7, а. Такая конфигурация дает

возможность использовать световоды большой длины (на практике до сотен метров) при малых общих габаритах (обычно в пределах 10 – 30 см). При этом следует учитывать, что если радиус намотки имеет величину  $\sim 10$  см и менее, стандартные волоконные световоды могут менять свои свойства. Начинают возрастать потери и, что важнее для интерферометра, могут ухудшаться свойства сохранения поляризации ДЛП световодов. Поэтому для малогабаритных конструкций преобразователя с волоконными катушками, часто приходится использовать специальные световоды, допускающие намотку с требуемым радиусом.

При намотке волокна в катушку обычно используют не свободную волоконную катушку, а намотку на поверхность опорного механического элемента, например, на цилиндр из эластичного материала, рисунок 2.7, б. В этом случае сохраняются достоинства конфигурации катушки, но добавляется действие опорного цилиндра как механического преобразователя. В большинстве случаев при использовании опорного цилиндра основным механизмом модуляции фазовой задержки световода является продольное удлинение вследствие изменений диаметра цилиндра  $d_{\text{ц}}$  вызванных деформацией цилиндра от внешнего воздействия. При этом эффективность создания колебаний  $d_{\text{ц}}$ , АЧХ, эффективная площадь взаимодействия с измеряемым воздействием и т.п. параметры обычно определяются уже размерами и материалом цилиндрической оправы, а так же дополнительными механическими элементами конструкции. Однако цилиндрическая оправка может обеспечить и другие механизмы модуляции фазы. Например, в конструкции с волокном, намотанным на эластичный опорный цилиндр, и жесткой внешней цилиндрической оправой



эффективно реализуется модуляция фазы за счет поперечного сжатия световода [11].

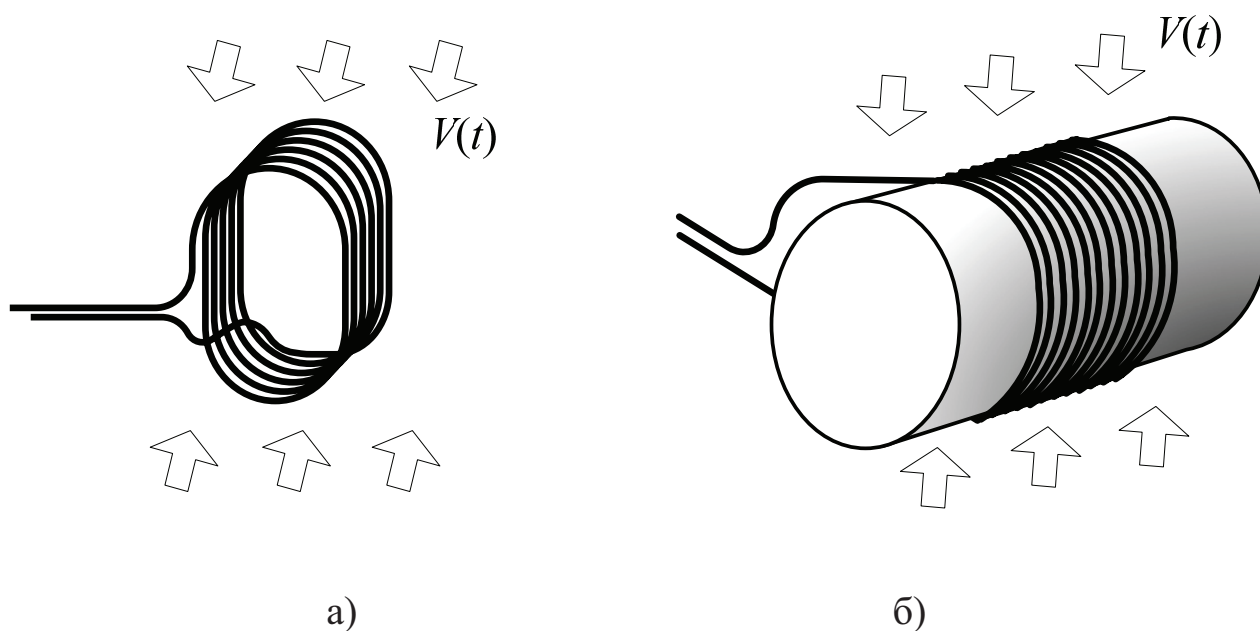


Рисунок 2.7. Конфигурация волоконного чувствительного элемента на основе световода, смотанного в катушку. Слева – «свободная» катушка, справа – катушка на опорном цилиндре.

Более конкретное рассмотрение принципов построения преобразователей в волоконных интерферометрических датчиках будут рассмотрены в п.2.4.

## 2.3. Фазовая чувствительность волоконного интерферометра к внешнему воздействию

Как было показано в п. 2.1, одним из ключевых параметров при анализе волоконного интерферометрического датчика является фазовая чувствительность интерферометра  $K_V$  – отношение приращения разности фаз интерферирующих сигналов  $\Delta\varphi$  к вызвавшему его воздействию  $\Delta V$ .

Рассмотрим связь фазовой чувствительности интерферометра  $K_V$  и фазовой чувствительности образующих его световодов  $k_V$ . Подчеркнем, что в данном рассмотрении значения  $k_V$  могут отличаться от оценок рассмотренных в п. 2.1, если используется какая-либо преобразующая конструкция. В случае преобразователя величина и даже тип воздействия, оказываемого непосредственно на световод, может значительно отличаться от внешнего воздействия на чувствительный элемент.

### 2.3.1. Фазовая чувствительность двухплечевых волоконных интерферометрических схем

Будем полагать, что чувствительный элемент, содержащий двухплечевой волоконный интерферометр, подвержен некоторому внешнему воздействию  $\delta V$ . Фазовая чувствительность двухплечевого интерферометра может быть записана в виде

$$K_V = \frac{\delta\varphi}{\delta V} = \frac{\delta\varphi_1 - \delta\varphi_2}{\delta V} = k'_{V1} \cdot l_1 - k'_{V2} \cdot l_2, \quad (2.31)$$

где  $k'_{V1}$ ,  $k'_{V2}$  – погонные чувствительности, а  $l_1$  и  $l_2$  – длины волоконных плеч.

Если оба волоконных плеча находятся в одинаковых условиях и имеют равную погонную фазовую чувствительность  $k'_{V1} = k'_{V2} = k'_V$ , то

$$K_V = k'_V \cdot \Delta l, \quad (2.32)$$

Результирующая чувствительность интерферометра пропорциональна разности длин плеч.

Как видно из (2.32) для увеличения чувствительности надо увеличивать разность хода, что имеет место в т.н. **сильно разбалансированных** интерферометрических схемах. В таких интерферометрах  $l_1 \gg l_2$ ,  $\Delta l \approx l_1$ .

$$K_V \approx k'_V \cdot l_1. \quad (2.33)$$

В этом случае расположение второго плеча в чувствительном элементе и его погонная чувствительность фактически не имеет значения. В схемах, основанных на таком подходе второе плечо обычно «вырождено» и его длина определяется только технологически необходимым для соединения ответвителей отрезком световода, рисунок 2.8. Однако такие двухплечевые схемы применяются редко. Как уже говорилось ранее, в сильно разбалансированных интерферометрах существенны влияния флуктуаций частоты источника. Кроме того, при регистрации механических внешних воздействий возникает проблема сильного паразитного влияния колебаний температуры (если  $\Delta l = 10$  м, то изменение температуры на один градус приводит к сдвигу  $\Delta\phi$  в сотни радиан).

Значительно более привлекательны для построения высокочувствительных интерферометрических датчиков т.н. **сбалансированные** интерферометры, в которых  $l_1 \approx l_2$ ,  $\Delta l \ll l_1, l_2$ . Если фазовые чувствительности плеч одинаковые, то согласно (2.32) получим очень слабую чувствительность, стремящуюся к нулю при снижении разности хода. Поэтому при использовании балансных

интерферометров для повышения чувствительности нужно создать разность погонных чувствительностей волоконных плеч  $k'_{v1} \neq k'_{v2}$ .

Для получения разных чувствительностей волоконных плеч необходимо создать разные условия передачи внешнего воздействия к плечам. При этом используют изоляцию одного плеча от измеряемого воздействия, передачу воздействия к плечам с разным знаком (т.н. «push-pull» схемы), разнесение волоконных плеч в пространстве и т.п. способы [12]. Отметим, что указанные методы создания разности чувствительности эффективны для механических воздействий. Чувствительность же одинаковых по длине световодов к квазистатическим тепловым воздействиям трудно сделать существенно различной за счет пассивной конструкции.

Рассмотрим подробнее чувствительность основных из отмеченных выше интерференционных схем.

1) Схемы с изолированным от воздействий опорным плечом, рисунок 2.9, а. В этих схемах одно из плеч интерферометра находится под влиянием измеряемого воздействия, а второе плечо полностью или в значительной степени изолировано от влияния воздействия. Первое плечо называют сигнальным, а второе – опорным. Поскольку полагается значительное различие чувствительностей, то  $k'_{v1} \gg k'_{v2}$ , и из (2.31) получим

$$K_v \approx k'_{v1} \cdot l_1. \quad (2.34)$$

Чувствительность (2.34) фактически повторяет выражение (2.33). Но, в отличие от случая с вырожденным плечом, данная схема позволяет снижать вклад частотных шумов и паразитное влияние флуктуаций температуры. Несмотря на простоту идеи, возможность эффективной реализации такого принципа зависит от конкретной задачи и требований

к чувствительному элементу. Не всегда возможно обеспечить внутри ЧЭ область в достаточной степени изолированную от влияния воздействий для расположения протяженного опорного плеча.

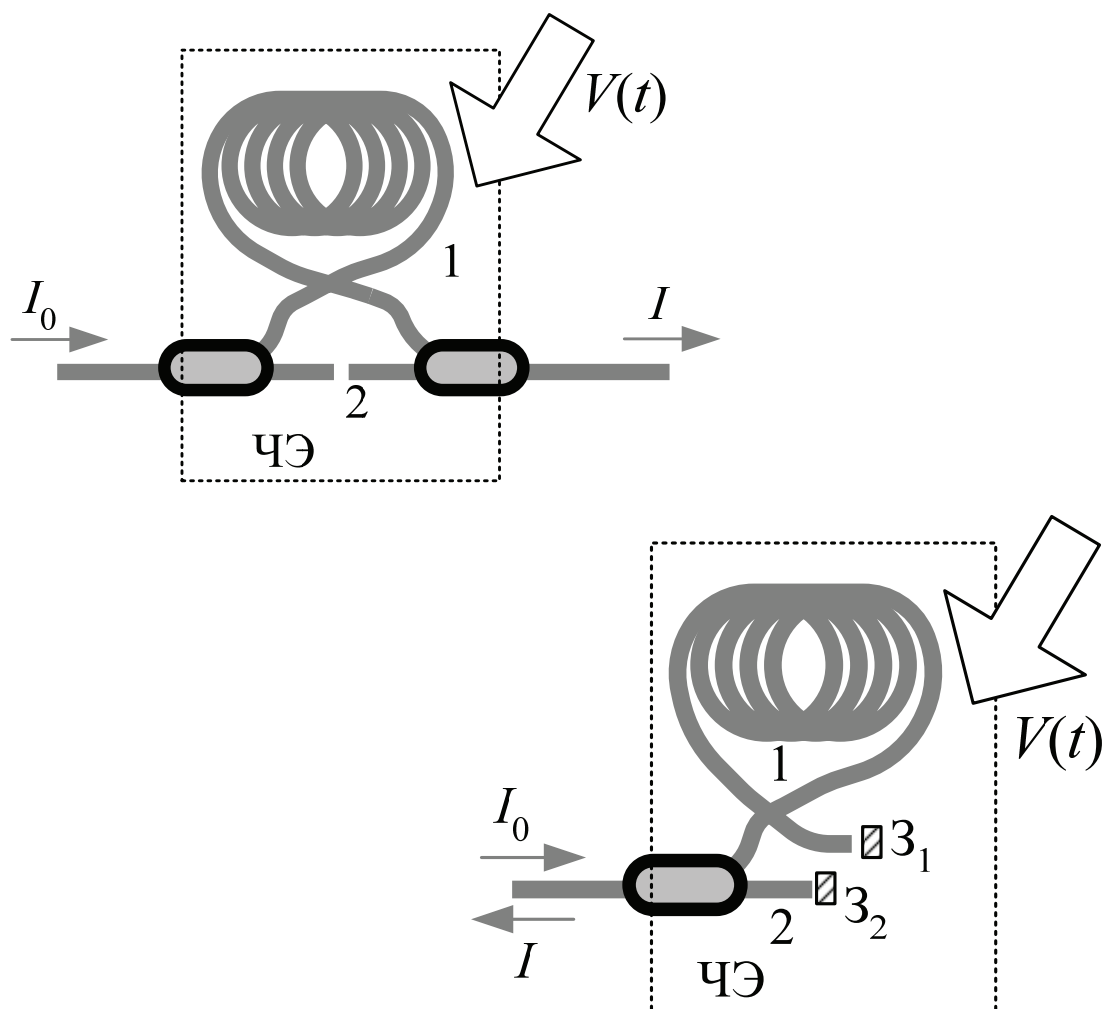


Рисунок 2.8. Разбалансированные интерференционные схемы с «вырожденным» опорным плечом. Вверху интерферометр Маха-Цендера, внизу интерферометр Майкельсона.

2) Дифференциальные схемы типа «Push-pull», рисунок 2.9, б. В таких схемах обеспечиваются примерно равные по величине, но противоположные по знаку чувствительности плеч  $k_{V1} \approx -k_{V2}$ . Тогда достигается чувствительность

$$K_V \approx 2 \cdot k'_V \cdot l_1, \quad (2.35)$$

Оба плеча сигнальные, но изменения фазовых задержек плеч не вычитаются, а складываются.

Как видно чувствительность «push-pull» схем может быть в два раза выше, чем в схеме с изолированным опорным плечом. Однако более важным фактором для выбора того или другого подхода является возможность и удобство ее реализации для конкретной задачи.

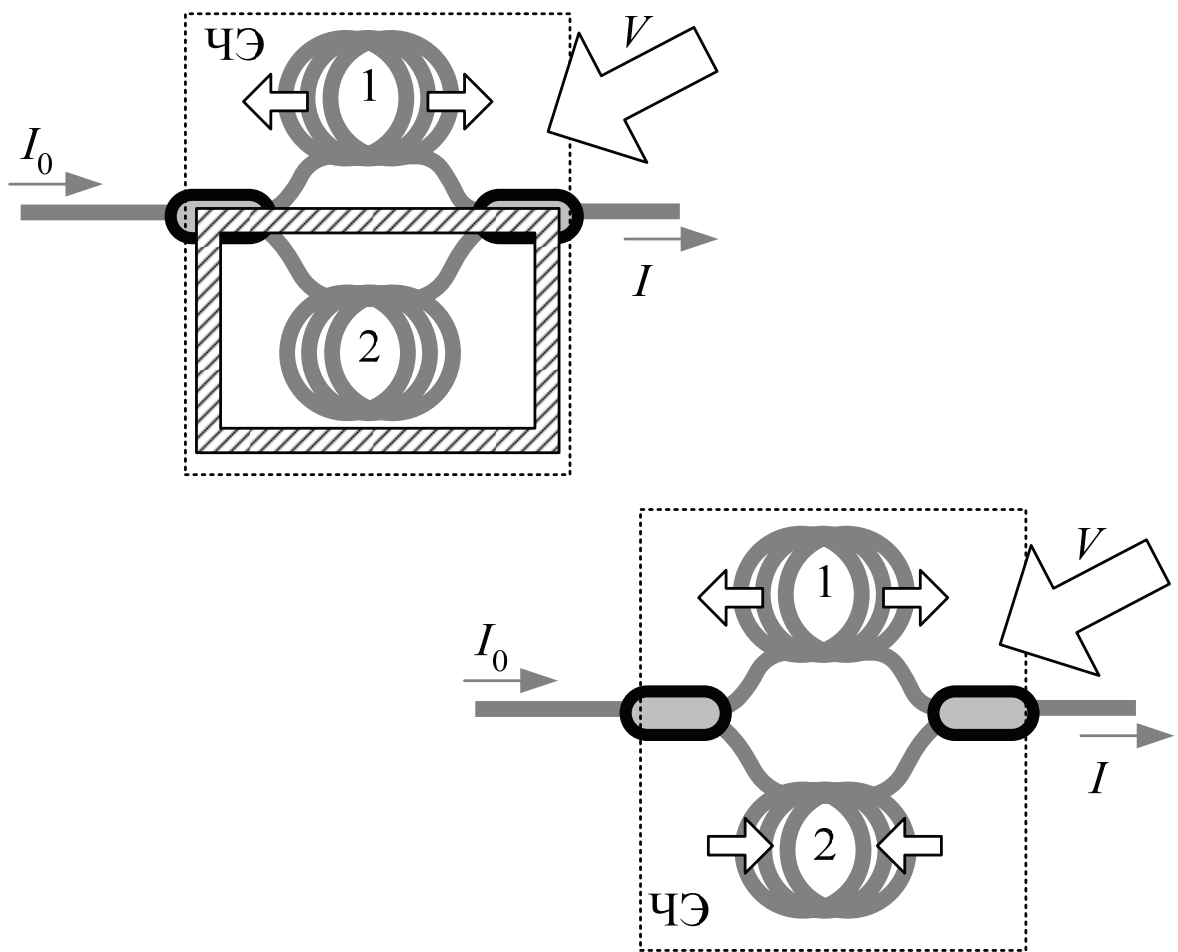


Рисунок 2.9. Принцип работы сбалансированных интерферометров Маха-Цендера, сверху – при изолированном опорном плече и внизу – при «push-pull» конструкции.

Как уже отмечалось, достоинством преобразователей со сбалансированным интерферометром и разностью чувствительностей плеч является компенсация влияния тепловых воздействий. Действительно, для тепловых воздействий погонная чувствительность световодов обоих плеч одинакова и

$$K_T = k'_T \cdot \Delta l. \quad (2.36)$$

Условие малости  $\Delta l$  обеспечивает снижение  $K_T$ . Однако на практике значение  $\Delta l$  нельзя считать пренебрежимо малым. Для дистанционных датчиков возможная разность хода, как правило, ограничена снизу. Но даже в отсутствие ограничений при практическом изготовлении сбалансированной схемы технологически невозможно обеспечить сколь угодно малую разность хода (на практике трудно обеспечить значение  $\Delta l$  менее единиц сантиметров). Поэтому вклад флуктуаций температуры хотя и значительно снижается, но не исчезает. Учитывая высокую температурную чувствительность световодов (2.15) понятно, что для  $\Delta l \sim 1$  см, при значительных колебаниях внешней температуры изменения  $\Delta\varphi$  могут существенно превышать  $2\pi$ . Поэтому, с одной стороны, указанная ранее проблема работы волоконных интерферометров, связанная с тепловым дрейфом рабочей точки характеристики интерферометра сохраняется и в данных схемах преобразователя. С другой стороны, снижение  $K_T$  позволяет уменьшить скорость и, следовательно, частотный диапазон температурных флуктуаций  $\Delta\varphi$ . Это важный фактор для исключения влияния неизбежного паразитного теплового дрейфа  $\Delta\varphi$  на измерение механического воздействия.

### **2.3.2. Фазовая чувствительность одноволоконных интерферометров**

Фазовая чувствительность рассмотренных ранее одноволоконных интерферометрических схем составляет для интерферометра Фабри-Перо

$$K_V = \frac{\delta\varphi}{\delta V} = 2 \cdot k'_V \cdot l, \quad (2.37)$$

и для кольцевого интерферометра

$$K_V = \frac{\delta\varphi}{\delta V} = k'_V \cdot l. \quad (2.38)$$

Для этих относительно простых одноволоконных интерферометров характерна та же проблема влияния частотных шумов источника, что и для разбалансированных двухплечевых схем с коротким, «вырожденным» плечом. Причем с точки зрения чувствительности одноволоконные интерференционные схемы не уступают таким двухплечевым схемам. Однако это не значит, что одноволоконные схемы всегда предпочтительней разбалансированных двухплечевых схем. Не следует забывать, что сигналы двухплечевых схем и многолучевых одноволоконных интерферометров при высоком контрасте значительно отличаются (см. часть 1). Поэтому, с учетом дальнейшей обработки интерференционного сигнала оказывается, что для создания высокоточных датчиков обычно предпочтительны двухплечевые интерферометры.

### **2.3.3. Увеличение длины чувствительных световодов.**

В п. 2.2.1 полагалось, что интегральная чувствительность световода к воздействию растёт пропорционально длине световода (исключением является растягивающее воздействие, заданное через относительное



удлинение  $\varepsilon$ ). Поэтому при анализе чувствительности интерферометров в п. 2.3.1 2.3.2 подразумевалось, что при правильном формировании схемы, значение  $K_V$  становится пропорционально длине чувствительных световодов. С учетом этого фактора для увеличения фазовой чувствительности интерферометра необходимо увеличивать длину чувствительных плеч. Оптическое волокно имеет малые поперечные размеры, поэтому при относительно небольших габаритах катушки, например 20 сантиметров, длина смотанного световода может достигать до единиц тысяч метров. Если на основе приведенных выше соотношений сделать оценки фазовой чувствительности для эффективных воздействий (тепловое, растяжение), то в случае километровых длин плеч можно получить огромные значения  $K_V$ , позволяющие ожидать феноменальной разрешающей способности интерферометрических датчиков. Действительно, с одной стороны именно значительная длина взаимодействия является основой высокой разрешающей способности волоконных интерферометрических измерителей. Однако с другой стороны, возможность роста чувствительности за счет длины световодов не безгранична. Есть целый ряд факторов, вследствие которых линейное увеличение чувствительности с ростом длины световода прекращается или приводит к значительным трудностям.

– Для измерителей механических воздействий, в эффективной конструкции волокно подвергается растягивающему усилию со стороны конструкции преобразователя. С увеличением длины волокна и количества слоев волокна в катушке она сама становится все более жестким элементом конструкции, препятствующим растягивающему усилию.

- В практических схемах значительный рост длины волоконных плеч интерферометра, как правило, приводит к увеличению влияния шумов активных компонентов системы. При этом проблемой становится увеличение потерь оптической мощности в волоконной катушке.
- С ростом длины волокон интерферометра усложняется проблема устранения влияния паразитных воздействий, как температурных, так и механических. Даже в сбалансированных схемах трудно сохранять равные чувствительности плеч к тепловым и другим паразитным воздействиям при значительном росте волоконных плеч интерферометра.
- В сбалансированных интерферометрах при росте длин плеч трудно обеспечить сохранение малого значения разности хода.
- В случае использования анизотропных волокон, с ростом протяженности волокон возникает проблема, связанная со снижением их способности сохранять состояние поляризации.
- При значительных длинах волокон растут сложности технической реализации конструкции.

В результате в практических конструкциях длины чувствительных световодов обычно не превышают нескольких десятков метров, крайне редко используются датчики с длиной чувствительного световода более 100 м.

#### ***2.3.4. Погонная и нормированная фазовые чувствительности интерферометра***

Несмотря на указанные ограничивающие факторы роста длины чувствительных световодов в относительно широком диапазоне длин световодов происходит практически линейный рост  $K_V$  с длиной волокна. Поэтому для сравнения эффективности самой конструкции

преобразователя можно ввести погонную чувствительность интерферометрического преобразователя. Погонная чувствительность  $K'_V$  вводится как отношение  $K_V$  к длине чувствительных световодов  $l_S$ . В одноволоконной, схеме с изолированным опорным плечом  $l_S$  это длина участка световода, подвергаемого воздействию. В балансной схеме с изолированным плечом  $l_S$  – длина чувствительного участка сигнального плеча. В «push-pull» схемах величина  $l_S$  равна сумме длин чувствительных участков плеч.

Однако такая погонная чувствительность интерферометра используется редко. В зарубежных публикациях часто используется другой унифицированный параметр – **нормированная фазовая чувствительность**  $K''_V$ . В этом случае чувствительность  $K_V$  нормируется на полную фазовую задержку света  $\varphi$  в чувствительных световодах

$$K''_V = \frac{\delta\varphi}{\varphi \cdot \delta V}. \quad (2.39)$$

Нормированная фазовая чувствительность имеет размерность, обратную к измеряемому параметру. Учитывая связь фазовой задержки с длиной волокна, связь нормированной и интегральной чувствительностей имеет вид

$$K''_V = \frac{\lambda}{2\pi \cdot n} \cdot K'_V = \frac{\lambda}{2\pi \cdot n \cdot l_S} \cdot K_V. \quad (2.40)$$

## 2.4. Принципы построения волоконно-интерферометрических преобразователей

В п. 2.2.2 рассмотрены разнообразные функции, реализуемые волоконным преобразователем, а в п. 2.2.1 и 2.3.2. проанализированы закономерности формирования и оценки фазовой чувствительности различных интерференционных схем. При этом волоконные плечи интерферометров в общем случае могут быть реализованы с применением различных конструкций волоконных преобразователей для влияния на фазовую чувствительность световодов.

Таким образом, реальные измерительные устройства на базе волоконных интерферометров практически всегда подразумевают наличие определенной конструкции, в которой размещены волокна интерферометра. Эта конструкция образует **волоконно-интерферометрический преобразователь**. Он должен обеспечивать требуемые соотношения чувствительностей плеч, для реализации того или иного типа схемы (разбалансированная, сбалансированная с опорным плечом, «push-pull»). Так же преобразователь должен обеспечить высокую чувствительность интерферометра к измеряемому воздействию и, возможно, ряд других условий.

Рассмотрим принципы и примеры практического построения конструкций волоконно-интерферометрических преобразователей и волоконных интерферометрических чувствительных элементов.

### *2.4.1. Разбалансированные и одноволоконные интерферометры*

Относительно простым случаем является создание преобразователя для одноволоконных интерферометров или разбалансированных схем с вырожденным опорным плечом. Базовым вариантом построения такого

интерферометрического преобразователя можно считать конструкцию на основе эластичного цилиндра. Катушка волокна наматывается на боковую поверхность цилиндра и фиксируется (клеем, лаком, или другим способом). Обычно катушка защищена покрытием, сформированным либо фиксирующим катушку веществом, либо созданным дополнительно.

Характерен вариант конструкции, в которой механическое воздействие сжимает основания цилиндра. Такой вариант показан на рисунке 2.10, где воздействие, например давление в среде, передается на одно из оснований цилиндра. Возможен аналогичный вариант, когда давление осуществляется на оба основания. Воздействие, сжимающее и растягивающее эластичный цилиндр вдоль оси (рисунок 2.10, нижняя часть), приводит к изменению его диаметра  $d$  и, как следствие, к продольному растяжению световода.

В волоконных преобразователях с эластичным цилиндром нередко используется механическое воздействие (например, изотропное давление) на боковую поверхность цилиндра, рисунок 2.11 [12, 13, 19]. В этом случае, как и в предыдущем, основной механизм преобразования связан с изменением эффективного диаметра катушки  $d$  и продольным растяжением световода.

В конструкции преобразователя может использоваться полый цилиндр. Во внутренней части цилиндра могут быть размещены разветвители (зеркала), а так же короткое опорное плечо. С другой стороны, при применении полого цилиндра механическое воздействие на боковую поверхность может быть осуществлено с внутренней стороны, рисунок 2.12, а. Полый эластичный цилиндр может использоваться в комбинации с жестким опорным цилиндром, который

фиксирует внутреннюю или внешнюю поверхность эластичного цилиндра, рисунок 2.12, б, в.

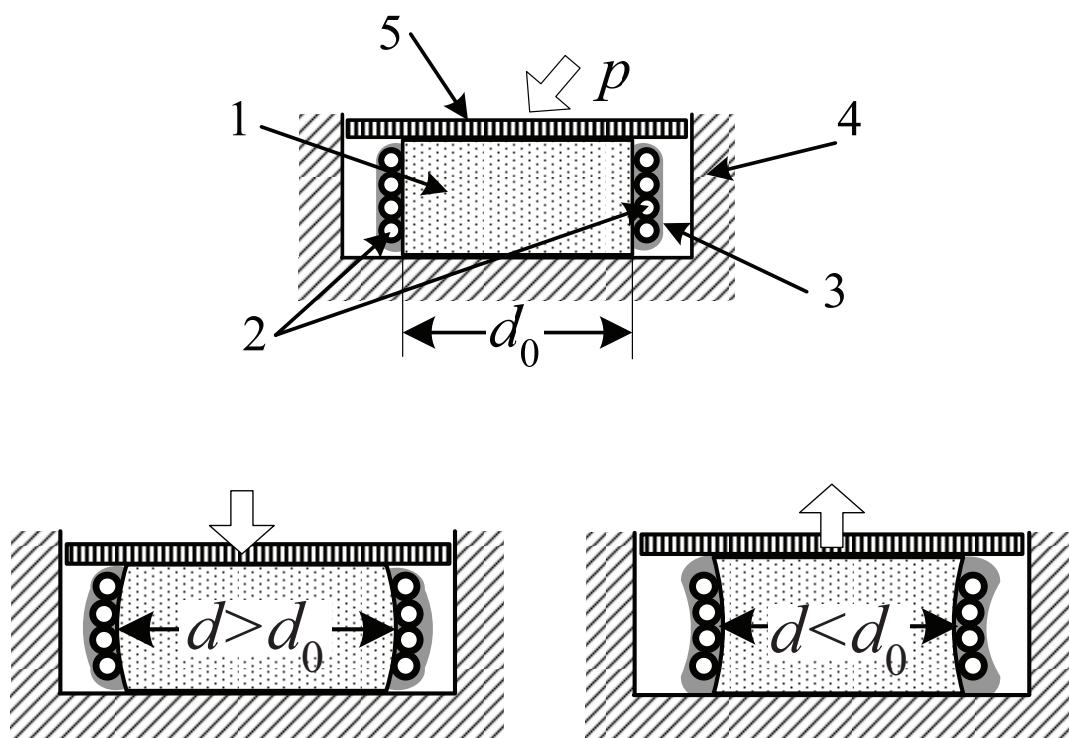


Рисунок 2.10. Преобразователь на основе эластичного цилиндра (механическое воздействие на основание цилиндра).

- 1 – Цилиндр из эластичного материала.
- 2 – Световод.
- 3 – Внешне покрытие катушки.
- 4 – Неподвижная жесткая часть конструкции.
- 5 – Подвижная/гибкая мембрана.

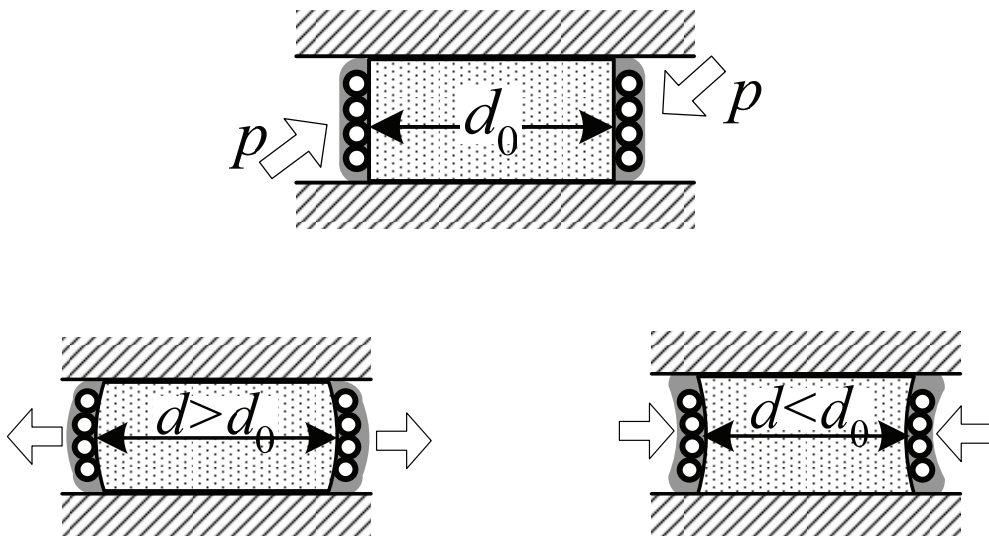


Рисунок 2.11. Преобразователь на основе эластичного цилиндра (механическое воздействие на боковую поверхность цилиндра)

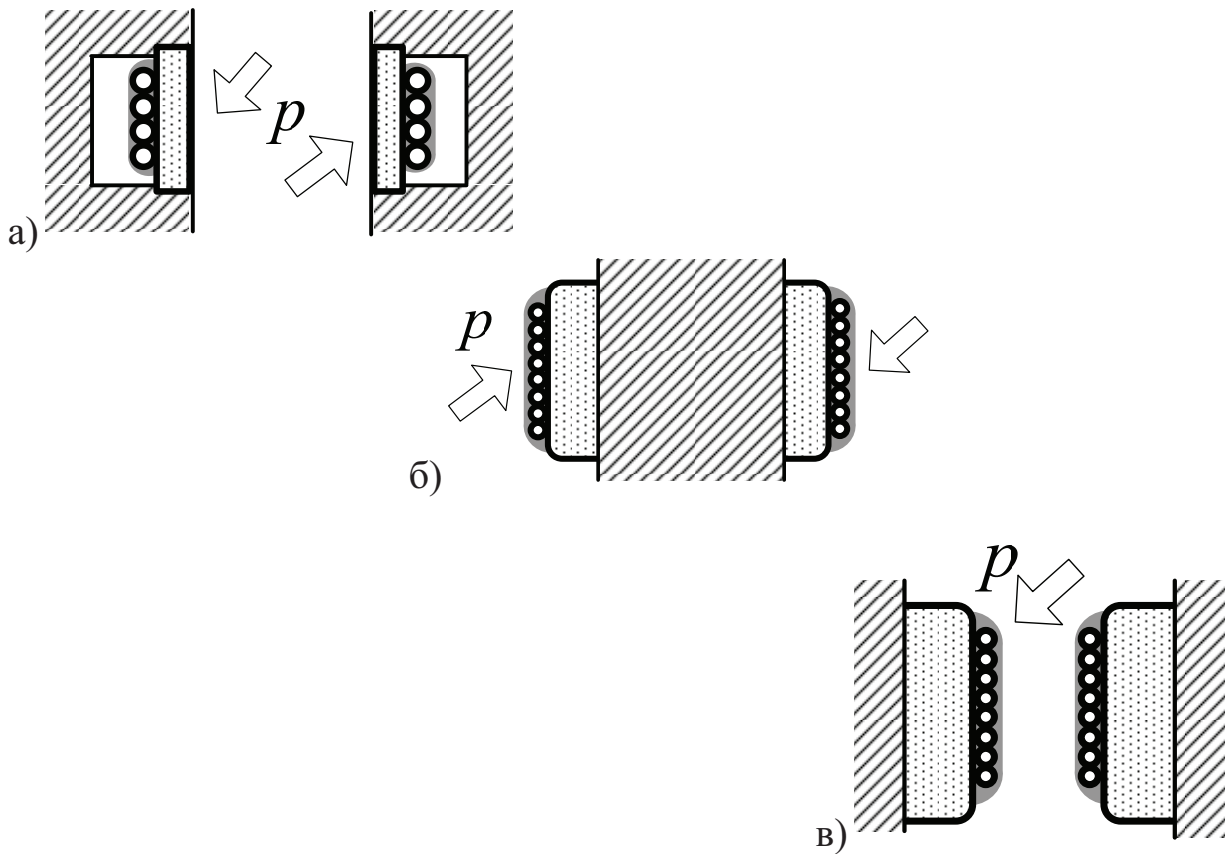


Рисунок 2.12. Преобразователь на основе полого эластичного цилиндра

В описанных примерах подразумевалось использование опорного цилиндра из эластичного материала. Возможны другие варианты с аналогичным результирующим механизмом передачи воздействия на световод. Например, конструкция, в которой волокно намотано на тонкий металлический цилиндр, закрепленный на жестком неподвижном корпусе с воздушным зазором [17, 19, 25], рисунок 2.13. За счет гибкости поверхности металлического цилиндра и воздушного зазора, при механических воздействиях на боковую поверхность цилиндра она может прогибаться или выгибаться аналогично поверхности цилиндра из эластичного материала.

В качестве альтернативного примера конструкции преобразователя можно указать вариант, где опорным элементом является гибкий диск, на поверхности которого закреплено волооко, намотанное по спирали [12, 16, 12]. Если диск прогибается, то, в зависимости от направления прогиба, эффективный диаметр катушки меняется и создается эффект продольного растяжения или сжатия световода, рисунок 2.14.

В приведенных примерах и на рисунках и в описании в качестве механического воздействия указывалось давление во внешней среде, как наиболее наглядный вариант воздействия, не требующий дополнительных специальных элементов конструкции. Однако конструкция с опорным цилиндром, так же как и с диском может быть адаптирована фактически для любого вида механического воздействия. К основанию опорного цилиндра, показанного на рисунке 2.15, может быть приложена сила, созданная воздействием любой природы. Могут быть использованы дополнительные механические элементы (передачи, рычаги и т.п.) для преобразования произвольного механического воздействия в усилие сжатия внешней боковой поверхности цилиндра



или внутренней поверхности полого опорного цилиндра. Можно задействовать промежуточные преобразования, например внешняя сила давит на поршень, и создает давление в замкнутом объеме, в который вмонтирован опорный цилиндр.

Характерный простой пример дополнительного механического элемента – применение инерционной массы [15]. Жесткий элемент массой  $m$  закрепляется на подвижной поверхности конструкции чувствительного элемента, например, на основании эластичного цилиндра, рисунок 2.15. Подобная колебательная система эквивалентна контуру первого порядка и имеет резонансную частоту  $f_R$ , связанную с механическими параметрами элементов, в том числе значением  $m$ . При колебаниях всей конструкции с частотами ниже  $f_R$ , сжатие опорного цилиндра оказывается пропорциональным ускорению  $a$ . Если колебания имеют частоту выше  $f_R$ , то цилиндр сжимается пропорционально амплитуде смещения корпуса. Таким образом, в низкочастотном диапазоне система работает как акселерометр, а в высокочастотной области как виброметр, рисунок 2.15. Аналогичным образом можно использовать инерционную массу в конструкции с опорным диском [20].

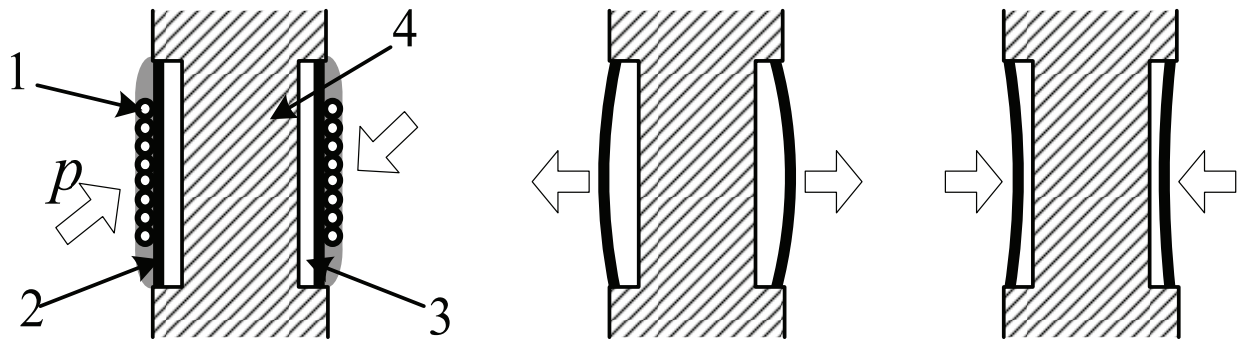


Рисунок 2.13. Преобразователь на основе металлического цилиндра  
 1 – световод. 2 – металлический цилиндр. 3 – воздушный зазор.  
 4 – неподвижная жесткая часть конструкции.

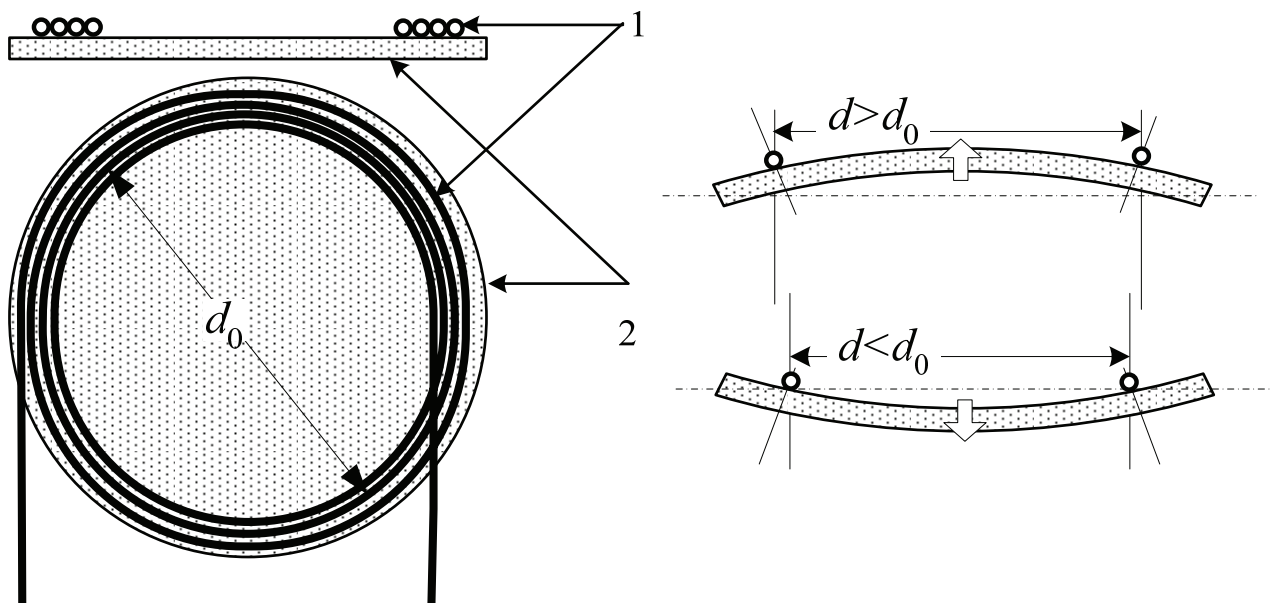


Рисунок 2.14. Преобразователь на основе гибкого диска  
 1 – световод. 2 – диск.

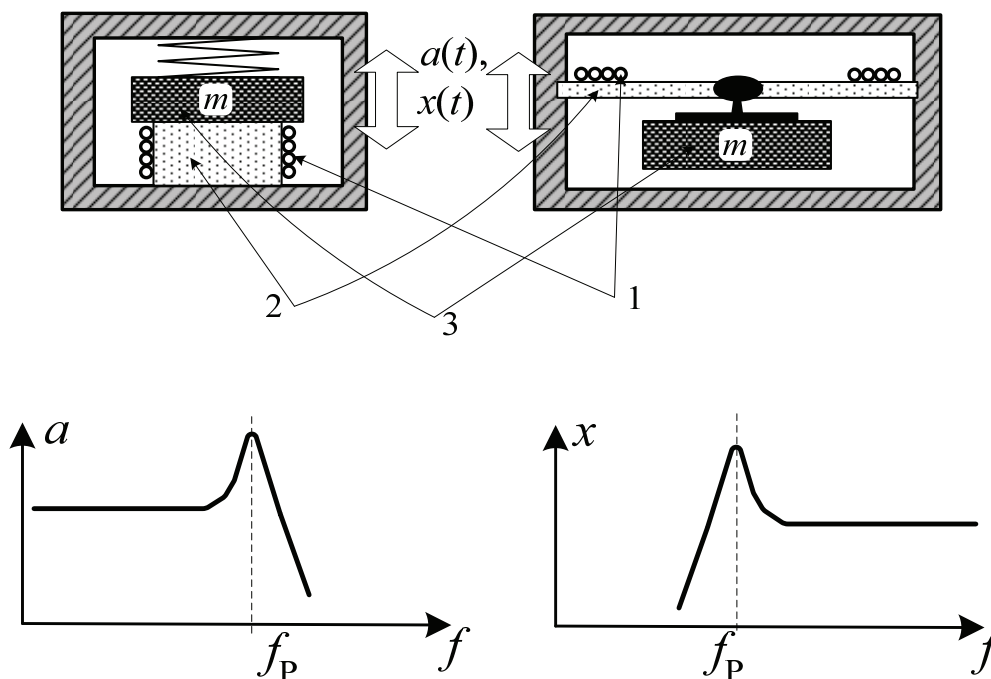


Рисунок 2.15. Преобразователь с инерционной массой. Конструкции с опорным цилиндром и диском (вверху), примерный вид частотной характеристики (внизу).

1 – Световод. 2 – Опорный элемент (эластичный цилиндр или гибкий диск). 3 – Инерционная масса.

#### 2.4.2. Схемы с протяженным изолированным опорным плечом

Если используются равноплечные (балансные) интерференционные схемы с опорным и сигнальным плечом, то необходимо поместить опорное плечо внутри корпуса чувствительного элемента с максимальной его изоляцией от влияния внешнего воздействия.

Для установки чувствительного плеча можно использовать все варианты, рассмотренные в п. 2.4.1. Однако теперь в этих конструкциях должно быть предусмотрено определенное место для размещения опорной катушки. Поскольку на опорное плечо не должно влиять внешнее воздействие его можно поместить в замкнутую полость,

используя внутренний объем полого опорного цилиндра или дополнительные секции корпуса, рисунок 2.16.

Для снижения габаритов чувствительного элемента диаметр волоконных катушек стараются снизить, но минимальный допустимый диаметр намотки световода ограничен. При размещении в корпусе двух равных волоконных плеч одна из катушек будет иметь больший диаметр (если одна катушка расположена внутри другой, рисунок 2.16 правая и левая схемы) либо они будут одинакового диаметра, но расположены рядом (рисунок 2.16 в средняя схема). В любом случае, габариты чувствительного элемента могут значительно увеличиться по сравнению со схемой без протяженного опорного плеча.

Для оптимизации габаритов чувствительного элемента следует сблизить диаметры опорной и сигнальной катушек. Для этого в конструкции с эластичным цилиндром на жесткой основе сигнальное плечо наматывают на поверхность эластичного цилиндра, а опорное плечо на поверхность жесткой основы, что предотвращает его растяжение от внешних акустических воздействий рисунок 2.17 [25].

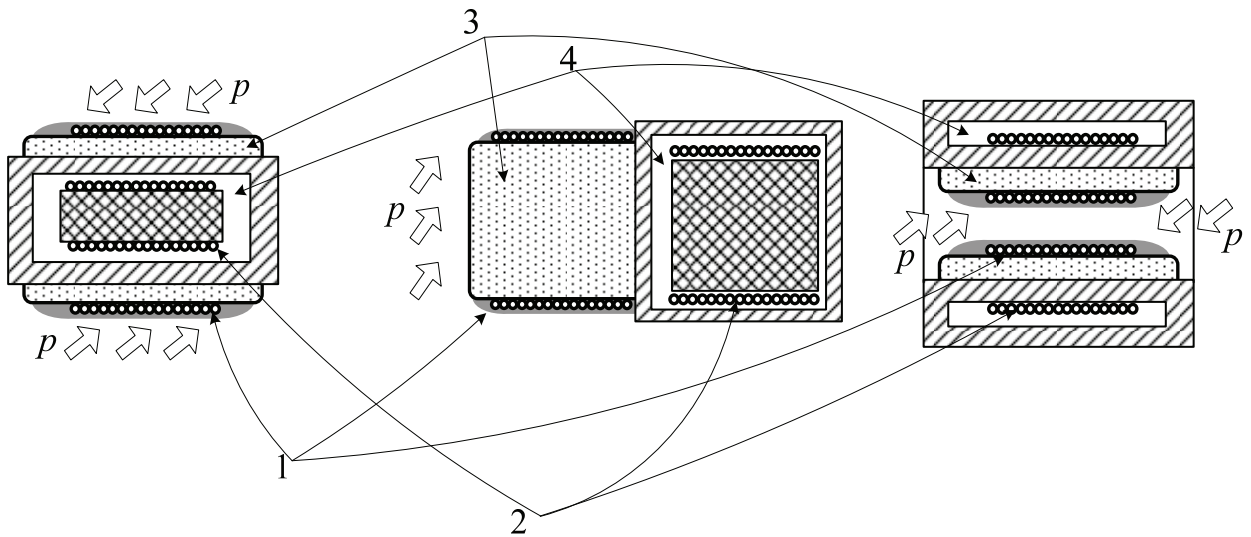


Рисунок 2.16. Преобразователь с изолированным опорным плечом.

1 – Катушка сигнального волоконного плеча. 2 – Катушка опорного

волоконного плеча. 3 – Эластичный опорный цилиндр.

4 – Изолированная полость в жестком корпусе.

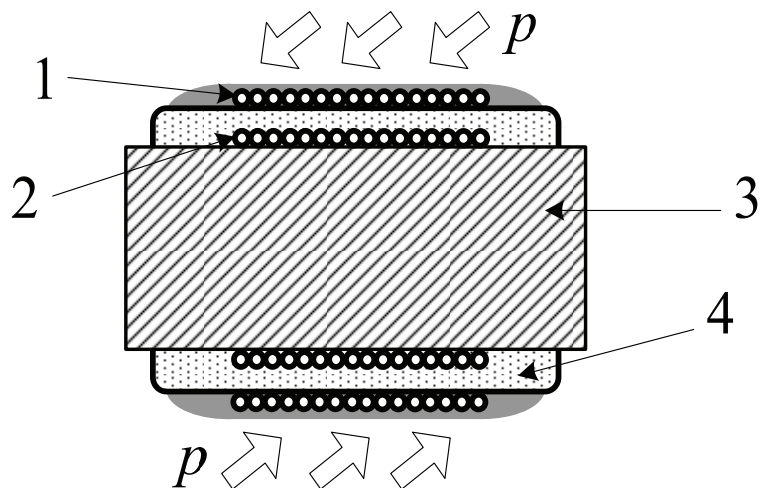


Рисунок 2.17. Преобразователь с фиксированным опорным плечом.

1 – Катушка сигнального волоконного плеча. 2 – Катушка опорного

волоконного плеча. 3. Жесткий цилиндр. 4 – Эластичный цилиндр.

### 2.4.3. Двухплечевые конструкции «push-pull» типа

Наиболее сложный случай – конструкция дифференциальных (пуш-пул) интерференционных схем. В практических разработках чаще всего встречаются конструкции, в которых волокно намотано на опорный цилиндр или на поверхность диска. При этом как обычно, за счет сматывания волокна в катушку, можно обеспечить относительно малые внешние габариты чувствительного элемента при достаточно большой длине плеч. Кроме того, конструкции должны обеспечить преобразование внешнего воздействия в эффективный механизм продольного растяжения волокна и создать дифференциальное (противофазное) воздействие на плечи.

Типичный вариант такой конструкции с применением опорных цилиндров показан на рисунке 2.18. Система состоит из двух последовательно соединенных эластичных цилиндров зафиксированных внешними основаниями на корпусе. Волоконные плечи интерферометра (на рисунке они обозначены 1 и 2) наматываются на поверхности цилиндров. Внешнее механическое воздействие передается на место стыка цилиндров. Как показано в правой части рисунка 2.18, продольные смещения места стыка создает противофазные изменения диаметров катушек плеч  $d_1$  и  $d_2$ . Если использовать такую конструкцию в корпусе с гибкой мембраной (рисунок 2.19, а), то можно создать преобразователь колебаний давления в среде  $p(t)$ , акустических или гидроакустических сигналов. Внешнее давление на поверхности мембраны создает силу, смещающую совмещенные основания цилиндров. Если применить инерционную массу, как источник формирования смещающей силы (рисунок 2.19, б), то можно создавать преобразователь ускорений  $a(t)$  либо вибраций  $x(t)$  корпуса [14, 15].

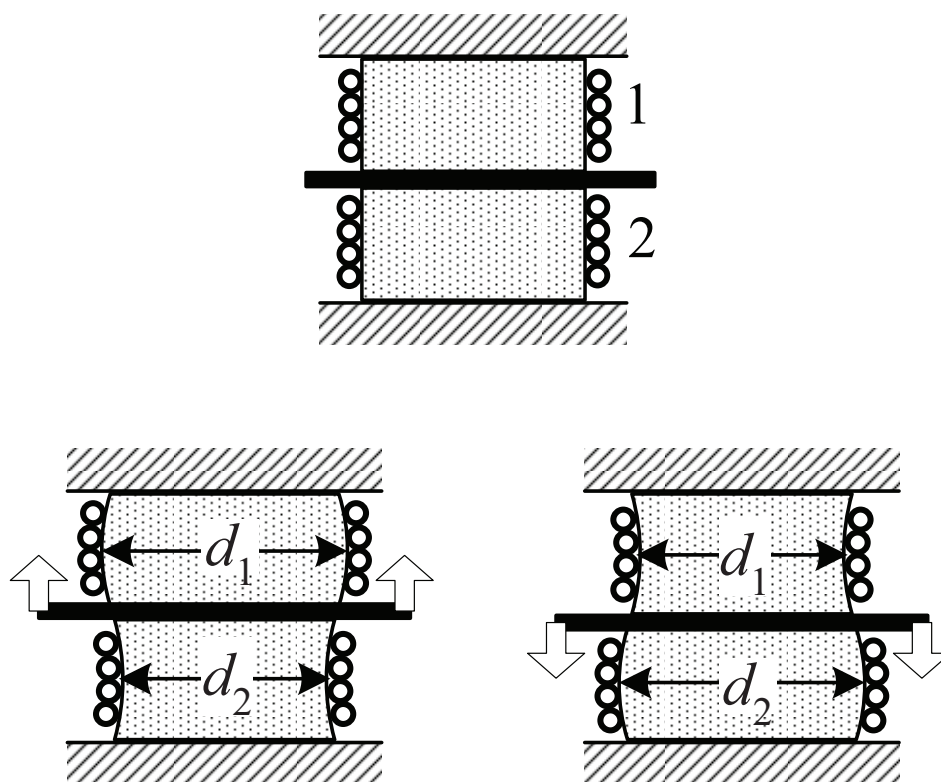


Рисунок 2.18. Преобразователь на основе последовательно состыкованных опорных цилиндров.

В другом варианте дифференциальной конструкции с опорным цилиндром используется один полый эластичный цилиндр, а два волоконных плеча намотаны на внешнюю и внутреннюю поверхности цилиндра соответственно, рисунок 2.20. Продольные смещения поверхностей, к которым прикреплены основания цилиндра, приводят к противофазным изменениям диаметров волоконных катушек плеч, как показано в правой части рисунка 2.20. Как и в предыдущем варианте, сжатие цилиндра за счет внешнего давления на мембрану (рисунок 2.21, а) позволяет создать преобразователь колебаний давления в среде (датчик акустических, гидроакустических сигналов). Использование инерционной массы (рисунок 2.21, б) позволяет сделать преобразователь для акселерометра или для вибromетра [28].

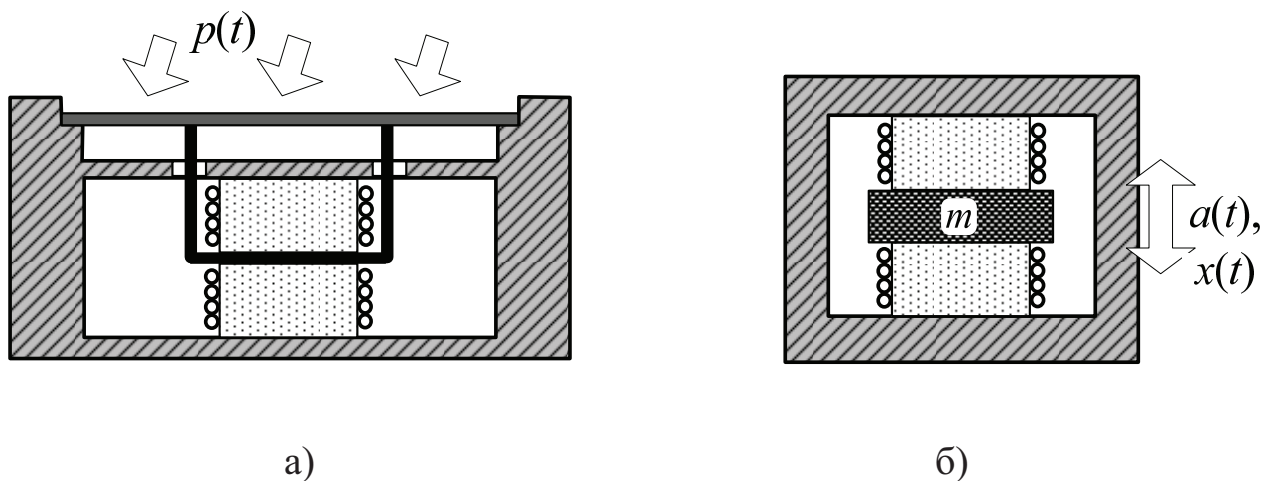


Рисунок 2.19. Построение чувствительных элементов на основе преобразователя с двумя цилиндрами.

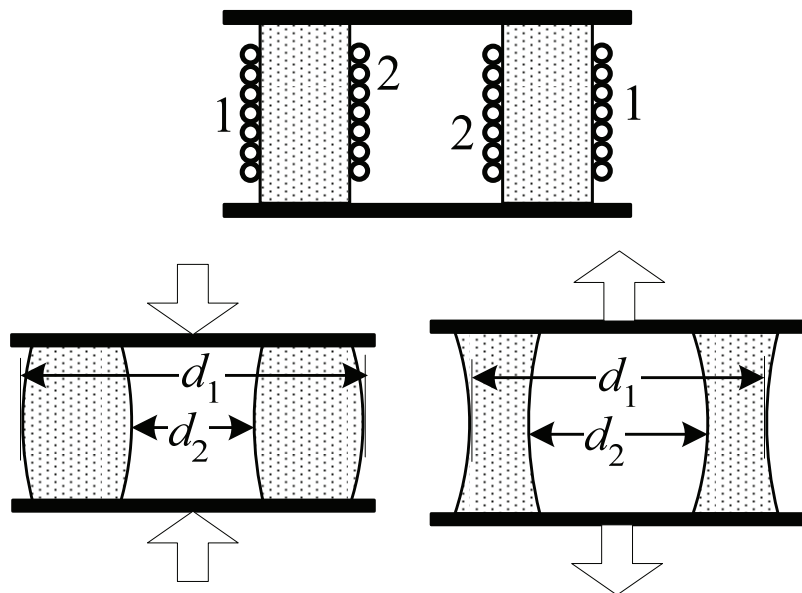


Рисунок 2.20. Преобразователь на основе полого опорного цилиндра.



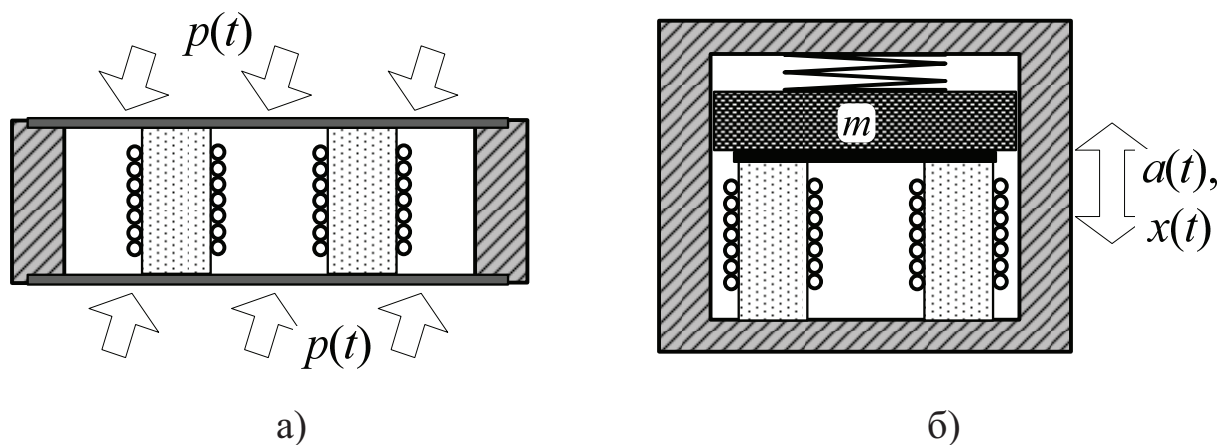


Рисунок 2.21. Построение чувствительных элементов на основе преобразователя с полым цилиндром.

Еще один принцип создания дифференциального преобразователя, который привлекает внимание разработчиков, подразумевает размещение катушек волоконных плеч на поверхностях гибкого диска, рисунок 2.21. Если в результате механического воздействия диск изгибается, то деформация поверхностей создает противофазное натяжение волоконных плеч, как поясняется в правой части рисунка 2.22. Так же как и в предыдущих преобразователях для формирования чувствительного элемента датчика колебаний давления можно передать внешнее давление через мембрану (рисунок 2.23, сверху). Хотя в данном случае в качестве мембраны часто используют сам диск [16, 19]. Для построения акселерометра или виброметра применяют инерционную массу создающую воздействие на центр диска, закрепленного по внешнему краю, либо на края диска, зафиксированного в центре (рисунок 2.22, внизу) [14, 18, 21, 22].

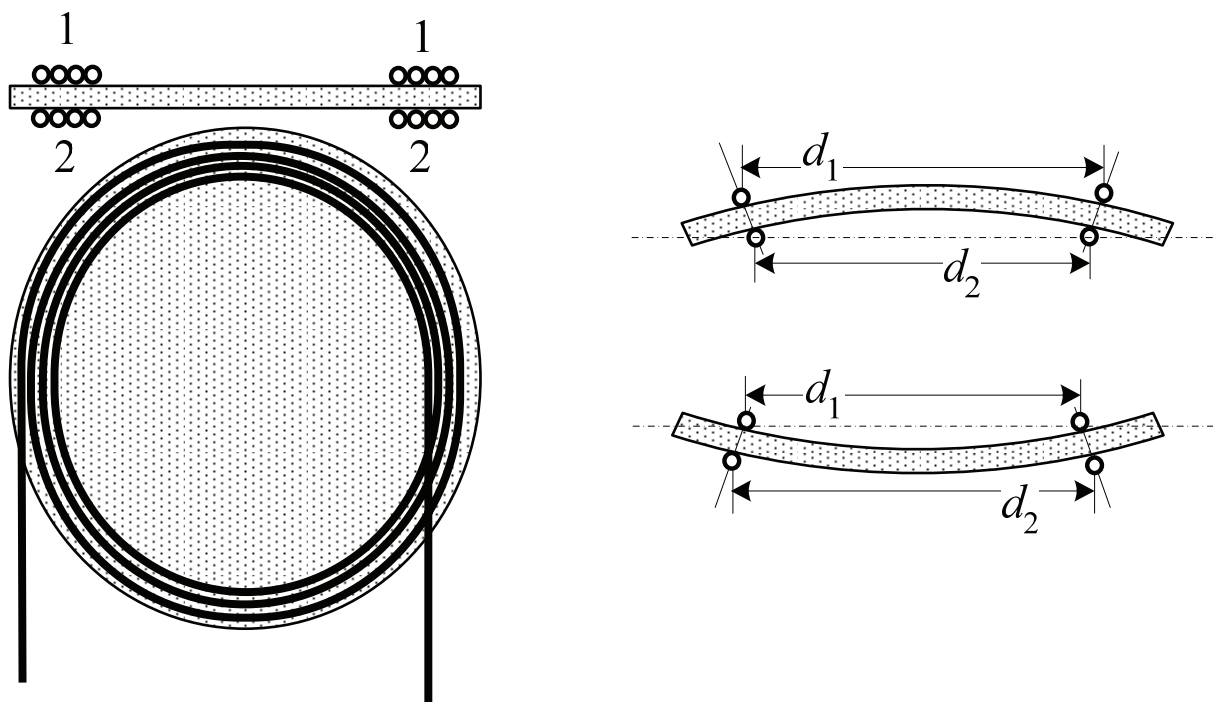


Рисунок 2.22. Преобразователь на основе диска.

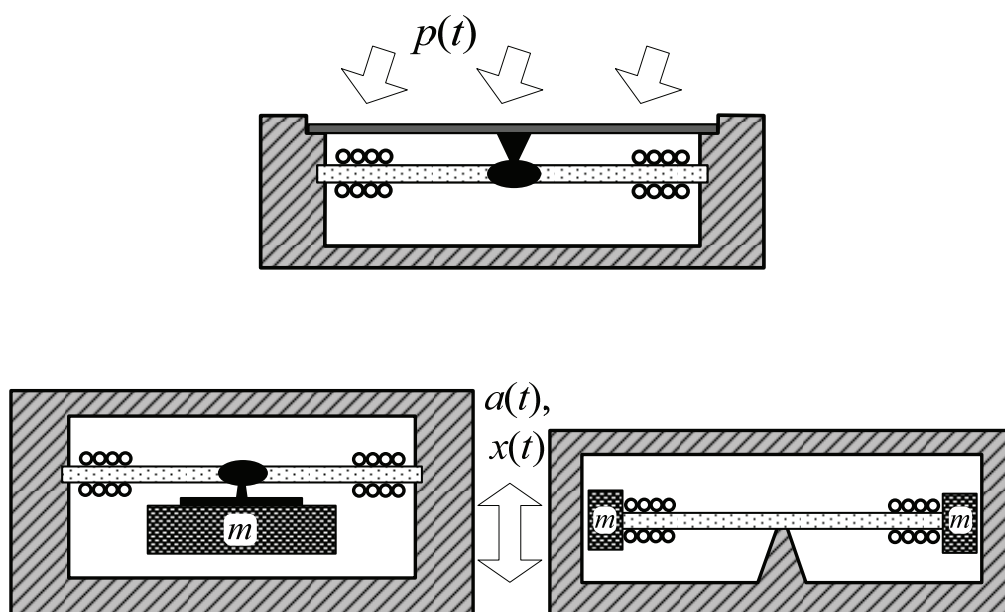


Рисунок 2.23. Построение чувствительных элементов на основе преобразователя с диском.

#### ***2.4.4. Фазовая чувствительность реальных волоконно-интерферометрических преобразователей***

Кроме принципов построения различных практических конструкций волоконно-интерферометрических преобразователей, важно знать какие значения чувствительности достигаются для этих конструкций.

Понятно, что на достигаемую величину чувствительности влияют очень многие параметры конструкции. Это и геометрические размеры узлов, и механические параметры материалов, то, как выполнена намотка и закрепление световодов. На зависимость чувствительности от частоты влияют и особенности формы узлов конструкции их крепления друг к другу и т.п. К сожалению, получить даже приближенные оценочные формулы, связывающие  $K_V$  и набор основных параметров рассмотренных выше типов преобразователей, в общем случае вряд ли возможно. Слишком много разных факторов влияют на значение чувствительности и в зависимости от конкретной реализации разные факторы могут играть решающую роль. Тем не менее, можно привести определенную информацию о достигаемой чувствительности волоконно-интерферометрических преобразователей к механическим воздействиям на основе данных о практически реализованных макетах и устройствах. В подавляющем большинстве случаев такие данные связаны с регистрацией акустических и гидроакустических колебаний, вибраций и ускорений.

Наиболее часто разработанные конструкции волоконных интерферометрических датчиков акустических колебаний ориентированы на применение в качестве гидрофонов. Типичные значения нормированной чувствительности, получаемые в волоконных интерферометрических гидрофонах, составляют [12, 17]  $K_p'' \approx -320$

дБ/мкПа. В пересчете на погонную чувствительность  $K'_p$  это составляет примерно  $10^{-3}$  радиан/(Па·м). При длине чувствительных волокон  $l_s = 100$  м получим оценку интегральной чувствительности  $K_p \sim 0,1$  радиан/Па. Однако в ряде разработок можно встретить более высокие значения, как нормированной, так и интегральной чувствительности. Например, в [16] на частотах 10–20 кГц нормированная чувствительность поднимается до -265 дБ/мкПа. В работе [13] при  $l_s = 108$  м,  $K''_p \approx -298$  дБ/мкПа и  $K_p \approx 2$  рад/Па, для экспериментального макета в [27]  $K_p$  составила единицы рад/Па при конструкции «push-pull» типа с длинами волоконных плеч 50 м.

Для акселерометрических преобразователей чувствительность и рабочий диапазон частот очень сильно зависят от величины инерционной массы и механических параметров колебательной системы преобразователя в целом. Режим акселерометра соответствует области частот ниже основного резонанса преобразователя. Типичные значения чувствительности  $K_a$  составляют от десятков [21] и сотен [14, 18, 24, 26, 28] до десяти тысяч [15] радиан/g.

В конструкциях волоконных интерферометрических виброметров, так же как и в акселерометрах, характеристики существенно зависят от механических параметров колебательной конструкции. Но рабочая область частот находится выше основного резонанса преобразователя. Типичные значения чувствительности  $K_x$  составляют от нескольких десятков и единиц сотен [22, 28] до нескольких сотен радиан/мкм [15].

Таким образом, можно подытожить, что для реальных волоконно-интерферометрических преобразователей акустических сигналов, вибраций и ускорения характерны следующие уровни чувствительности к механическим воздействиям

$$K_p \sim 1 \text{ радиан/Па}; \quad K_a \sim 10^3 \text{ радиан/g}; \quad K_x \sim 10^2 \text{ радиан/мкм} \quad (2.41)$$

Отметим, что при уровне фазовой разрешающей способности  $10^{-6}$  радиан/(Гц)<sup>1/2</sup> (п. 2.1) с учетом (2.7) получим оценки для разрешающей способности в полосе 1 Гц

$$\delta p_{min} \sim 1 \text{ мкПа}; \quad \delta a_{min} \sim 10^{-9} \text{ g}; \quad \delta x_{min} \sim 10^{-14} \text{ м} \quad (2.42)$$

#### ***2.4.5. Дополнительные требования к преобразователю***

Уже отмечалось, что при разработке практических конструкций волоконно-интерферометрических преобразователей приходится руководствоваться не только достижением высокой чувствительности и равномерной АЧХ в рабочей полосе частот, но и многими другими факторами. Приведем примеры подобных проблем построения практических конструкций датчиков, которые не обсуждались ранее.

При разработке гидрофонов создание эффективного преобразователя и достижение высокой чувствительности может быть серьезной проблемой. Погружение гидрофона в воду связано с приложением к преобразователю большого статического давления. В случае высокой чувствительности  $K_p$  большие растяжения световода, вызванные ростом статического давления, могут превысить пределы обратимой деформации световода и повредить волокно. В результате возникают ограничения в стремлении увеличить чувствительность преобразователя, либо необходимо применять сложные специальные конструкции, в которых световод находится под действием переменных

акустических колебаний, а растягивающее усилие от квазистатического внешнего давления скомпенсировано.

Другим примером является проблема перекрестной чувствительности к механическим воздействиям. Например, высокочувствительные конструкции акустических преобразователей, рассмотренные в п. 2.4.1.–2.4.3, оказываются чувствительными к вибрациям. И наоборот, виброметрические преобразователи реагируют на звуковое воздействие. Для преодоления акустической чувствительности виброметра нужно создавать достаточно жесткую конструкцию корпуса, препятствующую влиянию внешних звуковых волн на колебания инерционной массы внутри корпуса. Эффективно подавить паразитную чувствительность микрофона к вибрациям еще сложнее. Примером конструкции, обеспечивающей высокую степень подавления вибрационной чувствительности, является двухдисковая система, показанная на рисунке 2.2.3 [23].

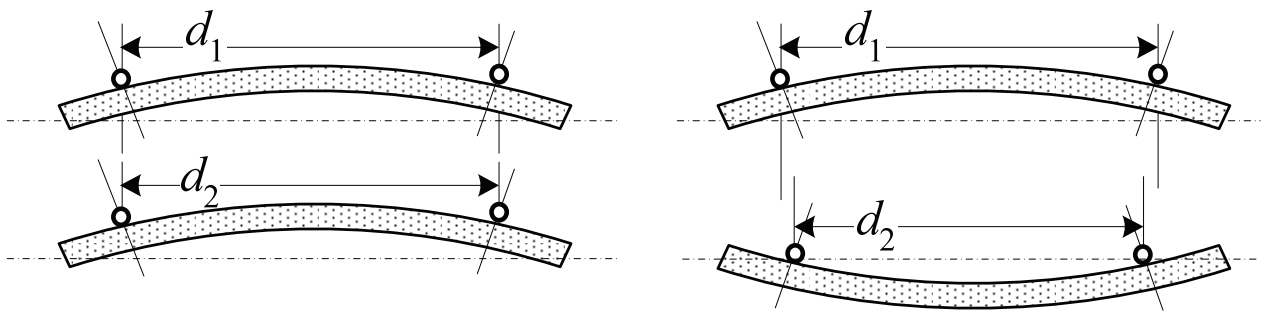
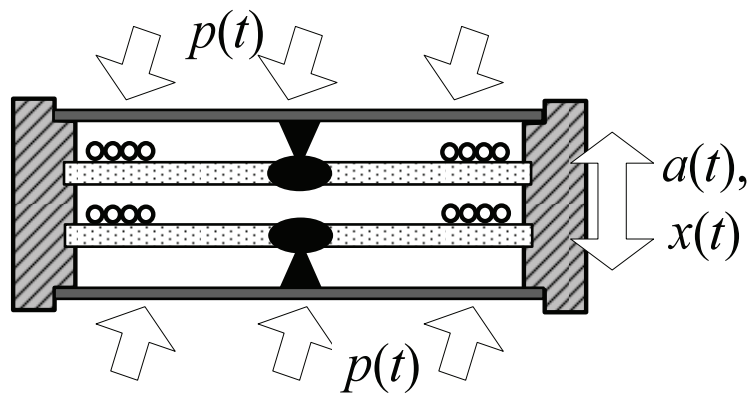


Рисунок 2.23. Конструкция чувствительного элемента волоконного интерферометрического микрофона с подавлением паразитной чувствительности к вибрациям

## Литература к части 2.

1. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. – 96 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1277).
2. Болтон У. Карманный справочник инженера метролога. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 384 с.
3. Волоконно-оптические датчики. Т. Окоси и др.: пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1990. – 256 с.: ил.
4. Волоконная оптика и приборостроение. М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Оробинский, Б. П. Пал; Под общ. Редакцией М. М. Бутусова. – Л.: Машиностроение. 1987.– 328 с.: ил.
5. Fiberoptic Sensor Technology Handbook. Charnel M. Davis, Edward F. Carome, Martin H. Weik, Shaoul Ezekiel, Robert E. Einzig. Optical Technologies (OPTECH), 1986.
6. Fiber Optic Sensor. Edited by Francis T. S. Yu, Shizhuo Yin. Marcel Dekker, Inc. New York, 2002
7. Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 152 с.: ил.



8. Fiber Optic Sensors - An Introduction for Engineers and Scientists. Edited by Eric Udd. John Wiley & Sons, 2006.

9. Шаталов Ф.А. Влияние температуры на фазовую и групповую задержку сигнала в одномодовом волоконном световоде. – Радиотехника и электроника, 1984, т.29, №11, с. 2283 – 2285.

10. Fiber Optic Acoustic Transduction. J. A. Bucaro, N. Lagakos, J. H. Cole, T. G. Giallorenzi. Physical Acoustics, Principle and Methods, Vol. XVI, 1982.

11. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Хлыбов А.В., Марков С.И., Кудряшов А.В.,

Наш Эффективный модулятор. Эффективный волоконно-оптический поляризационный модулятор. Письма в ЖТФ, 2004, т.30, вып. 7, с.7-13.

12. Overview of Mach-Zehnder Sensor Technology and Applications. A. Dandridge and A. Kersey. Fiber Optic and Laser Sensors VI, Proc. SPIE Vol.985, pp.34-52 (1988).

13. Very High Responsivity Fiber Optic Hydrophones for Commercial Applications. C. C. Wang, A. Dandridge, A. B. Tveten, A. M. Yurek. 10<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol.2360, pp.360-363 (1994).

14. Fiber Optic Gradient Hydrophones. A. M. Yurek, B. A. Danver, A. B. Tveten, A. Dandridge. 10<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol.2360, pp.364-367 (1994).

15. A Fiber-Optic Interferometric Seismometer. D. L. Gardner, T. Hofler, S. R. Baker, S. L. Garret. *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-5, NO.7, July 1987, pp.953-959.
16. A High Sensitivity Fiber Optic Planar Ultrasonic Microphone. S. Knudsen, A. M. Yurek, A. B. Tveten, A. Dandridge. 10<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol.2360, pp.396-399 (1994).
17. A High frequency Fiber Optic Hydrophone. A. B. Tveten, A. M. Yurek, Y. Y. Chao, A. Dandridge. 8<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol.1572, pp.350-353 (1991).
18. High Performance Fiber Optic Accelerometers. S. T. Vohra, B. Danver, A. B. Tveten, A. Dandridge. 11<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol.2719, pp.654-657 (1996).
19. Fiber Optic Ultrasound Sensors for Medical Applications. D. Wiesler, H. Wen, A. B. Tveten, B. Danver, A. Dandridge. 12<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, pp.358-361 (1997).
20. Fiber-Optic Accelerometer. Y. Shindo, N. Tsuchida, K. Dobashi, H. Kamata. 12<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, pp.202-205 (1997).
21. Performance of Multichannel Fiber Optic Accelerometer Array During a Undersea Structural Monitoring Test. S. T. Vohra, B. Danver, A. B. Tveten, A. Dandridge. 12<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, pp.604-607 (1997).

22. Fiber Optic Interferometric Displacement Sensor for Vibration Measurements. G. M. Nau, B. Danver, A. B. Tveten, S. T. Vohra. 12<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, pp.582-585 (1997).
23. Fieldtest of a fiber Optic Hydrophone. L. K. Cheng, D. de Bruijn. 11<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol. 2719, pp.184-187 (1996).
24. A Low-Frequency Fiber Optic Accelerometer Array for Mechanical Motion Detection. M. D. Todd, G. M. Nau, B. A. Danver, A. B. Tveten, S. T. Vohra. 12<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, pp.75-78 (1997).
25. Linearly Configured Embedded Fiber-Optic Acoustic Sensor. N. Lagakos, J. I. Bucaro. Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, NO 4, April 1993.
26. Transducer mechanism of an optical fiber accelerometer based on a compliant cylinder design. R. D. Pechstedt, D. A. Jackson. 10<sup>th</sup> Optical Fiber Sensors Conference, Proc. SPIE Vol.2360, pp.380-383 (1994).
27. Kotov O. I., Liokumovich L. B., Markov S. I., Medvedev A.V., Nikolaev V. M. "Remote Fiber-optical interferometer sensor of acoustic oscillations". Preprint NDTCS-99, St.Petersburg, Proc. of SPAS, vol.3,p. A22-A23.
28. Kotov O. I., Liokumovich L. B., Markov S. I., Medvedev A.V., Nikolaev V. M. "Fiber-optic sensor for the remote measurement of movement parameters of mechanical objects". Int. work-shop NDTCS-2000, St.-Petersburg,Russia. Proc. of SPIE, vol.4348, pp.57-58.