

3.5 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ, ИХ ТИПЫ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ В МЕДИЦИНЕ.

Известно, что подавляющее количество информации об окружающем его мире (свыше 90 %) человек получает посредством органов зрения. Поэтому использование электромагнитных волн оптического (светового) диапазона для связи и передачи информации является естественным способом общения человека с окружающей средой. Достоинством оптических методов связи считается сочетание быстродействия и направленности, однако, оба эти преимущества не были реализованы на практике до изобретения лазеров. В то же время, малая длина световой волны не позволяет использовать эффекты, благодаря которым осуществляется радиосвязь в длинноволновом диапазоне электромагнитных волн, и расстояние между источником оптического излучения и его приемником обычно ограничивается прямой видимостью. Создание волоконных световодов (ВС) позволило снять указанное ограничение.

Еще в далеком 1870 году английский физик (и альпинист) Джон Тиндаль продемонстрировал эффектный опыт (см. рис.1). Из сосуда 1 через кран 2 вытекала вода и сплошной струей 3 лилась в чашку 4. Вставленная в стенку сосуда напротив крана линза 5 фокусировала пучок световых лучей от наружной угольной дуги 6 и направляла его внутрь вытекающей струи. Свет распространялся по струе воды благодаря многократным внутренним отражениям лучей на границе сред вода-воздух.

Рис.2, а,б,в иллюстрирует явления отражения и преломления света на границе раздела двух сред с разными показателями преломления. На рис.2 а изображен луч света, распространяющийся прямолинейно в однородной среде с показателем преломления n_1 . На границе раздела со средой, имеющей показатель преломления $n_2 < n_1$, луч частично отражается и возвращается в первую среду, а частично преломляется и переходит во вторую среду. Если

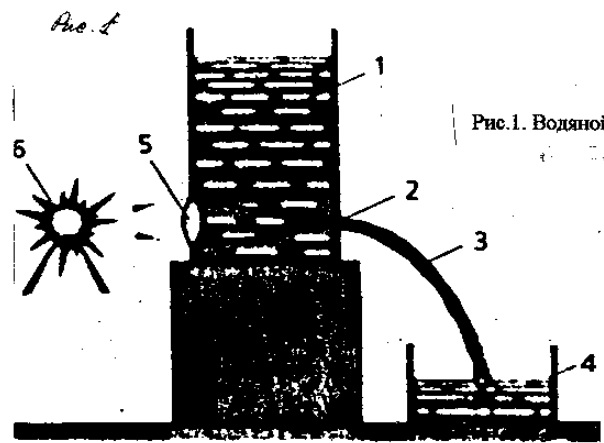


Рис. 1. Водяной световод в опыте Тиндаля.

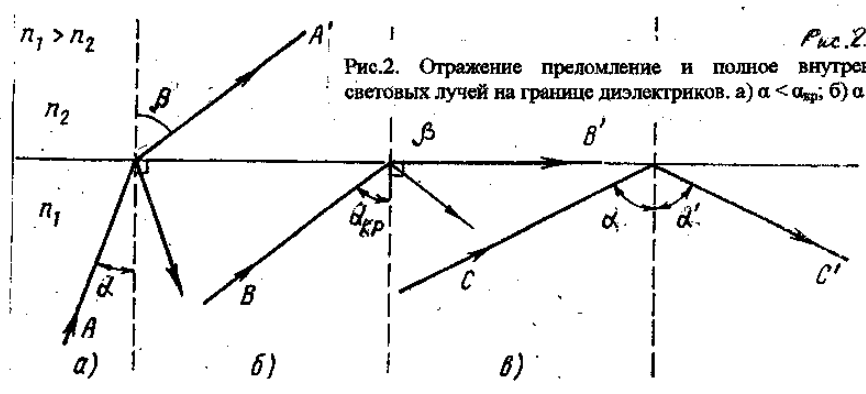


Рис. 2. Отражение преломление и полное внутреннее отражение световых лучей на границе диэлектриков. а) $\alpha < \alpha_{кр}$; б) $\alpha = \alpha_{кр}$; в) $\alpha > \alpha_{кр}$.

выполняются условия $0 < \alpha < \alpha_{кр}$ и $0 < \beta < \pi/2$, то справедливо следующее соотношение:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta,$$

где α и β – соответственно, углы падения и преломления.

При так называемом критическом угле, т.е., при таком угле падения $\alpha = \alpha_{кр}$, для которого угол преломления $\beta < \pi/2$ (рис.2, б)

$$n_1 \sin \alpha_{кр} = n_2.$$

Если угол падения $\alpha > \alpha_{кр}$ (рис.2, в), имеет место явление полного внутреннего отражения (ПВО), не сопровождающееся какими-либо потерями на границе раздела.

В 1905 г. знаменитый американский физик-экспериментатор Роберт Вуд высказал предположение о возможности передачи света по двухслойной стеклянной палочке с использованием внутреннего отражения луча. Но только в 50-е годы прошлого века удалось получить двухслойные стеклянные стержни и нити с большим показателем преломления у внутреннего слоя и меньшим - у наружного – ВС. Именно в волоконно-оптических линиях связи удается реализовать все преимущества света как носителя информации. Такие линии обладают высокой пропускной способностью, невосприимчивы к электромагнитным помехам, не подвергаются коррозии в агрессивных средах, имеют малые массу и стоимость, передача по ним недоступна для подслушивания и для перехвата. В последнее время активно разрабатываются и внедряются так называемые волоконно-оптические датчики (ВОД) различных физических величин. Создание устройств такого типа вызвано большой потребностью в датчиках давления, перемещения, температуры и т.д., пригодных для работы в условиях взрывоопасности, высокой радиации, высоких и низких температур, агрессивных сред и т.п. Кроме того, существует необходимость в повышении плотности потока информации и его помехозащищенности при передаче от объекта контроля. Важным достоинством ВОД является и то, что они позволяют производить соответствующие измерения дистанционно без контакта с объектом, т.е., предоставляют возможность

Рис. 3

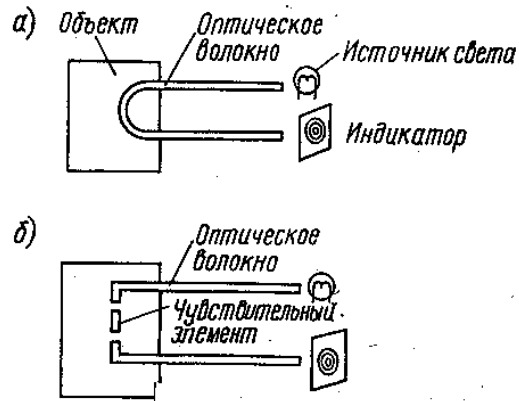


Рис. 3. Основные структуры волоконно-оптических датчиков. а) с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента; б) с оптическим волокном в качестве линии передачи.

Рис. 4

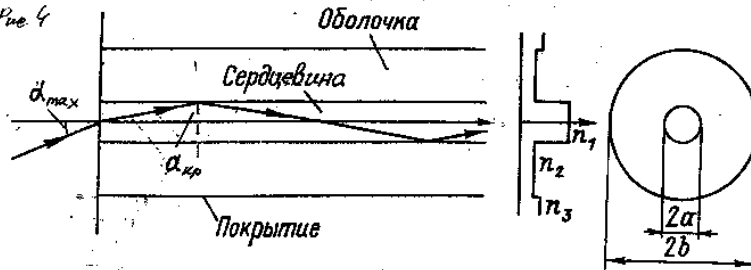


Рис. 4. Типовая структура оптического волокна и распространение света в нем.
а — радиус световедущей сердцевинки, б — радиус оболочки

оградить людей от работы во вредных условиях или в труднодоступных местах. Параметры многих ВОД превосходят аналогичные показатели традиционных приборов.

Под ВОД понимается измерительный преобразователь, содержащий отрезок волоконного световода либо оптический элемент (сенсор), оптические свойства которого зависят от внешнего воздействия, а также отрезки ВС, подводящие и отводящие оптическое излучение от места взаимодействия его с объектом контроля, соединенные с источником излучения и фотоприемником. Т.е., по характеру использования ВС ВОД делятся на два типа: 1) в которых волокно является собственно чувствительным элементом; 2) в которых волокно служит только для передачи сигналов (рис.3 а, б).

ВС (или оптическое волокно (ОВ)), являющийся основной частью ВОД, это тонкая нить (жила) круглого сечения из прозрачного в нужной спектральной области материала. Основные материалы для изготовления ВС – кварцевое стекло, некоторые многокомпонентные силикатные стекла и полимеры типа полиметилметакрилата (оргстекло). Световоды изготавливаются также из галоидных, халькогенидных и оксидных стекол и некоторых кристаллических соединений.

Свет, распространяющийся по ВС, представляет собой электромагнитную волну, поэтому, как и при описании любого оптического явления, для проведения строгого анализа необходимо применять математический аппарат волновой оптики. Однако основной механизм, обеспечивающий волноводное распространение света в ОВ, может быть полностью описан в рамках т.н. геометрикооптического подхода, в частности, при рассмотрении явления (ПВО) световых лучей в ВС со ступенчатым профилем показателя преломления (рис.4).

Конструкция ступенчатого световода включает в себя внутреннюю область, называемую сердцевинной, с высоким показателем преломления n_1 . Сердцевина окружена оболочкой, показатель преломления которой n_2 немного меньше, чем у сердцевинной ($n_1 - n_2 \approx 0,01$). Обычно диаметр сердцевинной составляет 4 – 100 мкм, а внешний диаметр волокна равен 100 – 200 мкм. Узконаправленный пучок лучей (лазера или светодиода) направляется в сердцевинную ВС через его полированную

торцевую поверхность (рис.4). Оптическое излучение распространяется через ВС благодаря многократным ПВО, испытываемым лучами внутри световедущей сердцевины на границе раздела сердцевина-оболочка, т.е., свет как бы запирается в сердцевине и распространяется только в ней. Траектория луча, каналируемого вдоль сердцевины, имеет зигзагообразный характер и ПВО происходит в каждой точке излома. Для реализации ПВО угол, под которым вводится луч света в ВС, по отношению к оси световода не должен превышать значения некоторого максимального или критического угла α_{\max} . Синус этого угла называется числовой апертурой и обычно обозначается NA:

$$NA = \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

У ступенчатых световодов числовая апертура, в зависимости от их функционального назначения, обычно лежит в пределах 0,1—0,5, что соответствует критическим углам $\alpha_{\max} \approx 5^\circ - 30^\circ$.

Если конический пучок лучей, падающих на входной торец идеально прозрачного световода, имеет угол при вершине $\alpha < \alpha_{\max}$, то он весь пройдет через световод, т.е., коэффициент оптического пропускания $T = I/I_0$, где I_0 и I - соответственно, интенсивности световых потоков на входе и выходе ВС. Если же $\alpha > \alpha_{\max}$, то при тех же условиях $T = \sin^2 \alpha_{\max} / \sin^2 \alpha < 1$.

Лучевое приближение справедливо лишь для описания распространения излучения в волокнах с поперечным сечением, много большим длины волны света. Если же размеры поперечного сечения волокна сравнимы с длиной волны излучения, то для анализа распространения света через такие ВС необходимо использовать электромагнитную теорию света и уравнения Максвелла. Строгое решение этих уравнений показывает, что по ВС малого сечения одновременно может распространяться определенный дискретный набор электромагнитных волн, называемых модами или собственными волнами. Каждая мода представляет собой колебание, которое характеризуется определенной пространственной структурой электрического и магнитного поля световой

волны и соответствующей постоянной распространения, т.е., фазовой скоростью. Таким образом, любое оптическое излучение, идущее по световоду, можно представить как суперпозицию мод, т.е., как результат сложения распространяющихся в нем колебаний. Число этих мод может быть рассчитано, если известны длина волны, радиус сердцевины и разность показателей преломления сердцевины и оболочки. В ВС толщиной от 1 до 5 мкм распространяется одна мода – одно колебание. В более толстых (от 10 до 100 мкм) может одновременно распространяться несколько колебаний (мод). Вследствие этого происходит размывание формы первоначального сигнала, что ограничивает передающие возможности многомодового ВС. Такое изменение формы сигнала называют дисперсией.

Распространяющиеся по световоду колебания теряют часть своей энергии из-за рассеяния света на малых неоднородностях материала световода, из-за поглощения и рассеяния света на ионах примеси, а также изгибах и микроизгибах ВС. Потери мощности оптического сигнала в волокнах оцениваются с помощью коэффициента ослабления β – логарифмической величины, численное значение которой определяет соотношение

$$\beta = 10 \lg P_0/P,$$

где P_0 и P – мощности сигнала на входе ВС и на его выходе, соответственно. Величину β называют также коэффициентом затухания (мощности). Единицей коэффициента ослабления является децибел.

Одномодовые ВС обладают значительно меньшим коэффициентом затухания (в зависимости от длины волны в 7 – 10 раз) по сравнению с многомодовыми и наибольшей пропускной способностью, так как в них почти не искажается сигнал. В настоящее время созданы световоды с потерями менее 1 дБ на километр.

Разработка ВС открывает широкие возможности развития новых методов измерения различных физических величин. В частности, знание физических характеристик ОВ необходимо при использовании его в качестве чувствительного элемента ВОД.

В ВОД происходит прямое или многоступенчатое преобразование регистрируемой физической величины в изменение параметров оптического излучения (рис.5). Внешнее воздействие может быть электрического, магнитного, теплового, механического, радиационного и других типов. Для того, чтобы эффективнее использовать ВОД, важно знать методы, применяя которые внешнее воздействие можно преобразовать в измеряемую величину, например, температуру – в давление. Одним из наиболее полезных измеряемых параметров является перемещение, которое относительно просто вызывается различными физическими эффектами.

Измеряемая физическая величина с помощью какого-либо физического эффекта (электро- или магнитооптического, пьезоэлектрического, акусто- или пьезооптического и др.) вызывает изменение оптических характеристик среды (чувствительного элемента или непосредственно ВС), по которой распространяется излучение (показателей преломления и поглощения, а также линейных размеров). Изменение этих параметров приводит в свою очередь к изменению (модуляции) какого либо из параметров проходящей через датчик световой волны. Световые волны имеют ряд параметров – амплитуду, частоту, фазу, поляризацию, модовый состав, когерентность, которые можно использовать при обработке информации.

Различие в схемах модуляции оптических характеристик световой волны лежит в основе классификации ВОД. Выделяют амплитудные датчики, называемые также датчиками интенсивности; фазовые датчики; поляризационные датчики; частотные датчики.

Следует заметить, что амплитудная модуляция излучения наиболее удобна для дальнейшей обработки выходного сигнала. Датчики интенсивности, как правило, имеют малые габаритные размеры, поскольку чувствительный элемент представляет собой либо специально встроенное в волоконно-оптический тракт модулирующее устройство, либо введенную в волоконную линию нерегулярность (разрыв, изгиб и т.д.). Другим достоинством датчиков этого типа является их совместимость с простыми в работе и доступными системами передачи информации на многомодовых волокнах. Наконец, для регистрации

Рис.5. Общая структура преобразований в волоконно-оптическом датчике.

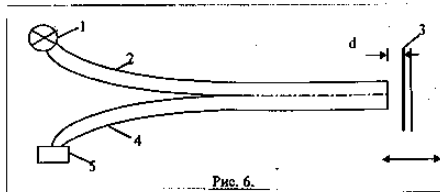
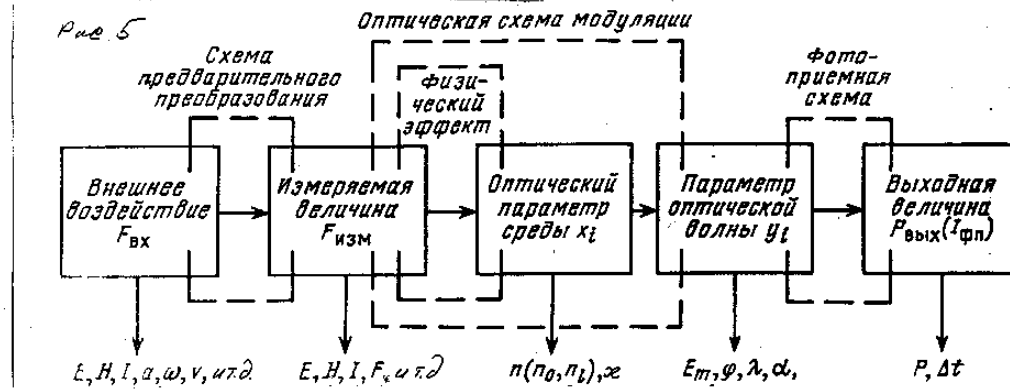


Рис. 6.

Рис.6. Волоконно-оптический датчик зазоров и перемещений.
1 – источник света (лазер); 2,4 – осветительный и приемный световоды;
3 – отражающая свет поверхность; 5 – фотоприемник.

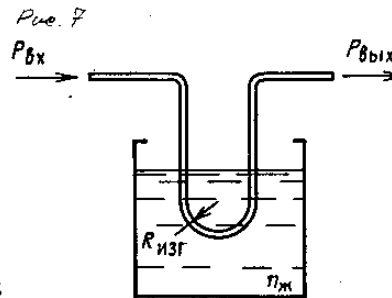


Рис. 7

Рис.7. Волоконный датчик давления, уровня или типа жидкости.

модулированного по интенсивности светового сигнала, применяется обычная методика фотодетектирования. Практически во всех случаях окончательно регистрируемой величиной является амплитуда тока на выходе фотоприемника. 7

Фазовые датчики используют эффект накапливающегося изменения фазы световой волны в протяженном отрезке волокна. Эти изменения зависят от длины оптического пути в чувствительном элементе и регистрируются интерферометрическим методом при наложении сигналов измерительного и контрольного каналов. Техника оптической интерферометрии позволяет фиксировать изменение фазы колебания вплоть до 10^{-8} рад, в связи с чем фазовые датчики являются наиболее чувствительными. С другой стороны, датчики этого типа не столь малогабаритны, как другие ВОД, поскольку волокно нельзя свивать в катушки диаметром меньше 3 – 6 см из-за резкого падения его светопропускания. Вследствие этого, фазовые датчики лучше подходят для создания распределенных, а не компактных приборов. Кроме того, для фазовых ВОД, как правило, используется одномодовое ОВ, что существенно усложняет их изготовление.

Основой для построения поляризационных датчиков является зависимость индуцированного внешним воздействием на оптическую среду изменения состояния поляризации излучения. Состояние поляризации может изменяться в результате индуцированного вращения эллипсоида поляризации (плоскости поляризации) излучения или индуцированного двулучепреломления. Для регистрации поляризационно-модулированного сигнала применяется схема со скрещенными поляризатором и анализатором.

Частотные датчики – сравнительно новый класс ВОД, прогресса в реализации которых следует ожидать в связи с созданием волоконных источников света и интерференционных фильтров в волоконном исполнении. В таких датчиках исследуемое физическое воздействие изменяет частоту генерируемого, отраженного или пропускаемого света.

ОВ может использоваться прежде всего для передачи оптического сигнала, несущего информацию об измеряемой величине. Хотя при этом световод играет пассивную роль, его использование дает целый ряд существенных преимуществ:

исключается влияние внешних электромагнитных помех, обеспечиваются высокие влаго- и теплостойкость, химическая инертность, возможность работы в труднодоступных местах, взрывоопасных средах (отсутствие искрения) и др. К ВОД этого типа относятся так называемые разрывные датчики, для которых является характерным то, что ОВ в контролируемой области имеет разрыв. Таким образом, модуляция параметров световой волны осуществляется в рабочем пространстве вне ОВ. Такие ВОД широко применяются в качестве датчиков механических величин. При соответствующей модификации измерительной схемы такое устройство может применяться в качестве датчика наличия жидкости, состояния поверхности объекта и его пространственного положения, скорости вращения объекта, частоты колебаний и т.п. Если, например, один конец волокна жестко закрепить, а другой установить на нужную деталь, то интенсивность света, переходящего из одного волокна в другое, окажется чувствительной к боковому смещению детали. Для контроля деформаций, зазоров перспективны волоконно-оптические рефлексометрические датчики малых перемещений, принцип действия которых основан на измерении световой энергии, попадающей из одного волоконного канала в другой за счет отражений от контролируемой поверхности (рис.6 а-б). Волоконные каналы представляют собой жгуты из передающих и принимающих оптическое излучение волокон. Интенсивность принимаемого света зависит от размещения волокон в жгуте и от зазора между торцом жгута и отражающей свет поверхностью (объектом). Этим датчиком измеряются давления до 10^4 Па и более. Его можно применять для измерения давления жидких сред, например, давления крови. Конструкция датчика с отражательной диафрагмой обеспечивает измерение колебаний в частотном диапазоне от нескольких Гц до 200 кГц, т.е., датчик такого типа может быть использован как оптический микрофон.

К датчикам указанного типа близки так называемые датчики с оптическим зондом. Схема ВОД с зондом из ОВ приведена на рис.7. В этом устройстве световая информация, излучаемая, отраженная или рассеянная контролируемым объектом, принимается с помощью соответствующей оптической системы

(объектив и ОВ) и поступает в световой детектор. ВОД с оптическим зондом отличаются высокой чувствительностью и обычно применяются в случае бесконтактных измерений, например, для определения температуры через тепловое излучение в металлургических процессах ($T \geq 2000$ °C).

Датчики с оптическим преобразователем представляют собой систему, которая содержит какой-либо оптический материал или чувствительный к внешнему воздействию оптический элемент, преобразующий изменение параметров ОК в изменение параметров светового луча. Преобразователь размещен между торцами передающего и приемного ОВ. Датчики этого класса обычно просты по конструкции (рис.3, б) и, как правило, высоконадежны. В основном в них применяются многомодовые ОВ. Нанося на торец волокна люминесцирующее вещество и используя температурную зависимость интенсивности (или спектра) свечения, можно измерять температуру. При этом, излучение, возбуждающее люминесценцию, подают по тому же волокну, но в другой спектральной области. Диапазон измеряемых температур определяется типом люминофора. В ВОД абсорбционного типа используется температурная зависимость оптического пропускания нанесенного на торец волокна слоя жидкого кристалла, термохромного материала или полупроводника.

Серьезной проблемой при изготовлении датчиков такого типа является необходимость точной взаимной юстировки волокон. От этого недостатка свободны безразрывные ВОД. Модуляция света в них происходит за счет изменяющихся в результате внешнего воздействия условий распространения света в веществе. Например, для регистрации давлений можно использовать отрезок изогнутого в виде петли световолокна (рис.8). Изменение давления в окружающей среде влияет на форму изгиба волокна и, соответственно, на интенсивность проходящего через петлю света. Как правило, применяются изгибы с радиусом, меньшим критического, при котором все излучение покидает сердцевину ВС и выходит в оболочку. При помощи такого датчика можно определить также плотность жидкости, например, электролита в аккумуляторе, что, в свою очередь, дает информацию о степени его заряженности. Для регистрации низких давлений используют устройство,

которое позволяет создавать в волокне чередующиеся микроизгибы (рис. 8).
Оптические потери на изгибах возрастают при увеличении давления, что дает возможность регистрировать довольно малые его изменения (до $10^{-4} - 10^{-5}$ Па).
Подобный датчик на микроизгибах волокна применяется также для детектирования акустических колебаний.

Работа ВОД может основываться на явлениях, происходящих на границе раздела сердцевинки волокна с оболочкой. В частности, фотоупругие свойства некоторых материалов (т.е., зависимость показателя преломления вещества от внешнего механического воздействия, акустического давления и др.) позволяют создавать датчики давления и усилия с нарушением ПВО. Так, если использовать ВС с полимерным покрытием, то флуктуации давления, воздействующего на ВС, приведут к амплитудной модуляции выходного оптического сигнала. Это связано с тем, что изменение показателя оболочки при приложении давления происходит значительно сильнее, чем у кварцевой (стеклянной) сердцевинки. В результате растет критический угол на границе сердцевинка-оболочка, что приводит к выходу части оптического излучения из сердцевинки в оболочку.

Заметное влияние на прохождение света оказывают условия на боковой поверхности световолокна, если с него удалить оболочку. Отрезок такого ВС успешно применяют для измерения уровня жидкости: по мере погружения световода в жидкость изменяется длина волокна, контактирующая с жидкостью, а ее показатель преломления обычно заметно больше, чем у воздуха.

В основу работы ВОД может быть также положен оптический туннельный эффект. Оптическое туннелирование – явление проникновения энергии световой волны через малый зазор (порядка длины волны света) между световодом и инородной средой (например, другим световодом). Уменьшение зазора может происходить под действием усилия (давления) со стороны некоторого физического тела, что позволяет на основе туннельного эффекта реализовать датчики давления. В частности, волоконно-оптический гидрофон (устройство для регистрации подводного звукового поля) с изменяемым зазором между скошенными торцами волокон позволяет измерять изменения давления около

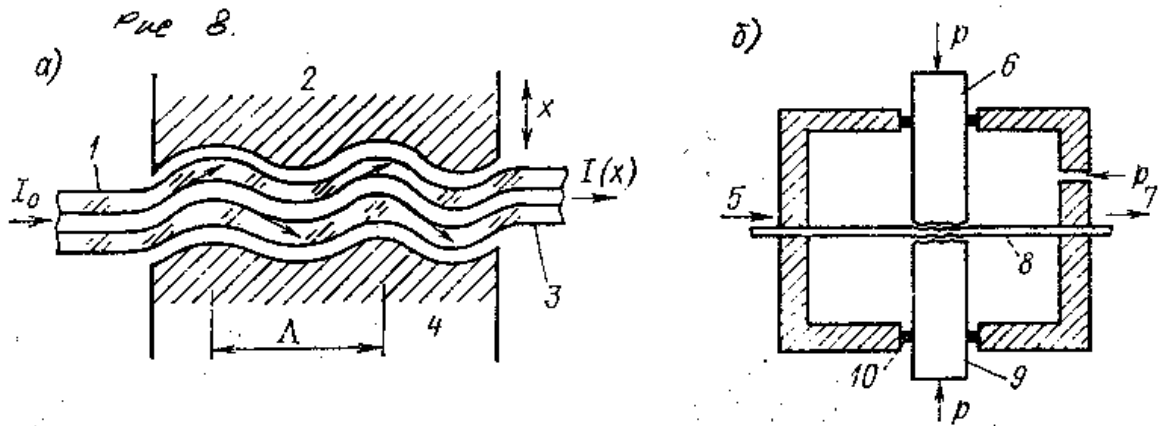


Рис. 8 Микроизгибный датчик: а) принцип действия; б) волоконный микроизгибный гидрофон.

1,5 – оптические входы; 2,6,9 – подвижные деформеры; 3,7 – оптические выходы; 4 – неподвижный деформер; 8 – волокно; 10 – уплотнение.

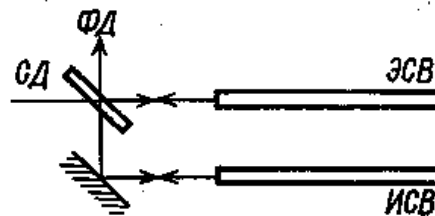


Рис.9. Принципиальная схема волоконно-оптического интерферометра для контроля деформаций и амплитуд вибраций.

СД – светоделитель; ФД – фотодетектор; ЭСВ и ИСВ – эталонный и измерительный отрезки световолокна.

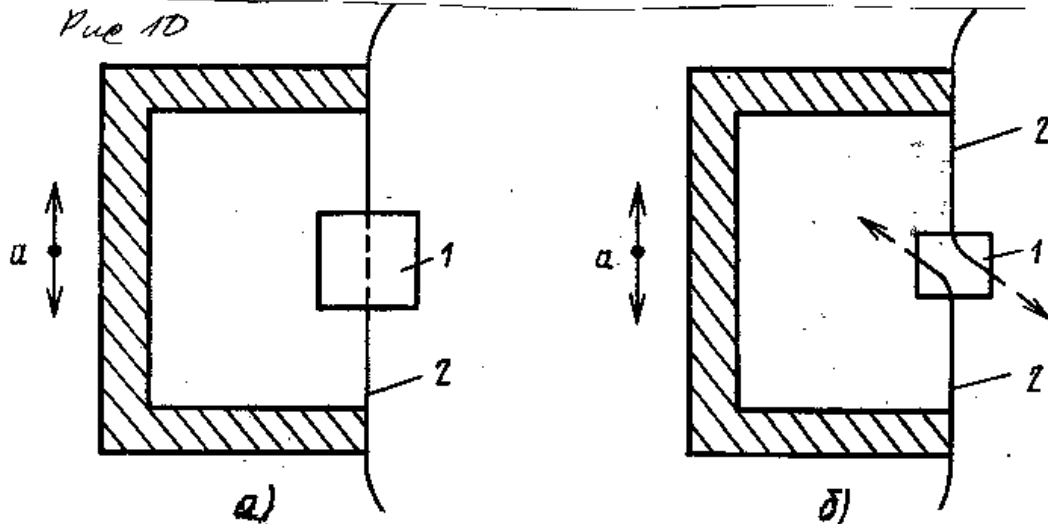


Рис.10. Элемент конструкции волоконно-оптического акселерометра, одноволоконного (а) и двухволоконного с дифференциальной регистрацией сигналов со световодов (б).

1 – инерционная масса; 2 – отрезок измерительного волокна.

10^{-6} Па. Для увеличения области оптического контакта более удобно осуществлять туннелирование энергии оптического излучения из ОВ непосредственно в мембрану, воспринимающую изменение внешнего давления. ВС должен в этом случае быть без оболочки, и ему можно придать форму плоской спирали, расположенной под мембраной.

Действие ВОД может основываться на процессах, происходящих в самом материале волокна. Оптические потери в волокне возрастают, в частности, в результате действия ионизирующих излучений, что используется для измерения накопленной (поглощенной) дозы рентгеновского или γ -излучений. Доза в 1 рад уменьшает пропускание кварцевого волокна на сотни децибел, что позволяет измерять малые дозы облучения. Отжиг восстанавливает свойства волокна, и его снова можно использовать для измерений. Полимерное волокно, легированное ароматическими соединениями, является сцинтиллятором, поэтому, регистрируя возбуждаемые в волокне вспышки, можно определять характеристики ионизирующего излучения (интенсивность, энергию и др.). В основе работы ВОД может лежать также явление Черенкова-Вавилова – эффект, состоящий в возникновении свечения в веществе (данном случае – в световоде) при прохождении через него заряженных частиц со скоростью, превышающей скорость света в этом веществе.

Кварцевое волокно, легированное редкоземельными элементами (неодимом, европием и др.), люминесцирует при освещении его коротковолновым ультрафиолетовым излучением. Явление температурного тушения такой люминесценции позволяет довольно точно измерять температуру окружающей среды в интервале 300 – 500 К. Можно также использовать тепловое излучение самого ОВ. Для высокотемпературной области вплоть до 2000 – 2200 К световод изготавливают из сапфира. Все ВОД температуры обладают низкими теплоемкостями и теплопроводностями, имеют малые постоянные времени, химически инертны, что делает их весьма перспективными для использования в медицине, например, при измерениях температуры внутри полостей, в тканях и т.п.

Для регистрации отклика ВОД на то или иное воздействие во многих случаях перспективно использование интерференционных схем, что обеспечивает высокую чувствительность и стабильность работы датчика. Волоконно-оптические интерферометры (ВОИ) по сравнению с классическими аналогами характеризуются следующими особенностями:

1) не нужно использовать прямолинейные оптические тракты и поэтому можно повысить чувствительность не прибегая к сложным многолучевым схемам, просто за счет применения многовитковой катушки волокна, расположенной в области ОК;

2) ОВ, имеющие малые поперечные размеры (125 – 400 мкм) практически безынерционно реагируют даже на сравнительно быстрое ($10^{-7} - 10^{-6}$ с) изменение окружающих условий;

3) ВОИ имеют меньшую массу и более простую конструкцию, чем его классический аналог, а следовательно, более пригоден для промышленного применения.

Рис.9 поясняет работу датчика механических нагрузок, которые испытывает какая-либо конструкция. Когерентное оптическое излучение в элементе связи поровну делится между двумя волокнами – «эталонным» и «измерительным». Первое из них изолируется от внешних воздействий, а второе помещается в зону контроля и подвергается деформации (в этом случае он жестко крепится к ОК) или нагреву. Индуцированное внешним воздействием изменение длины «измерительного» волокна вызывает дополнительный сдвиг фаз по отношению к лучу, прошедшему по «эталонному» волокну, что отражается на результате сложения обоих лучей, а значит, и на сигнале, регистрируемом фотоприемником. С помощью такого датчика на основе фазовой модуляции можно зарегистрировать деформации и перемещения порядка 0,01 мкм.

Рассматриваемую оптическую схему можно приспособить для реализации гидрофонов. В этом случае одномодовый световод наматывается на цилиндр диаметром в несколько сантиметров и размещается в зоне измерения (в воде), другой (контрольный) находится вне жидкости. В такого рода устройствах была

достигнута чувствительность, существенно более высокая, чем у известных пьезоэлектрических гидрофонов.

Аналогичную интерференционную оптическую систему можно приспособить для измерения напряженности магнитного поля, прикрепив «измерительный» отрезок ОВ к пластине из магнитострикционного материала (магнитострикция - изменение формы и размеров тела при его намагничивании). Под действием магнитного поля размеры пластины вместе с длиной волокна изменяются, что и регистрируется фотодетектором. Аналогичный результат получается, если на поверхность световолокна нанести покрытие из магнитострикционного материала. Порог чувствительности датчика в значительной степени определяется параметрами материала (чаще всего используется никель) и способом его крепления или нанесения на ОВ. К настоящему времени достигнутая на ВОИ датчиках чувствительность составляет $\sim 4 \cdot 10^{-7}$ А/м на 1 м длины ОВ, что сопоставимо только с чувствительностью магнитометров на основе сверхпроводников, так называемых сквидов. Но сквиды являются криогенными устройствами, чувствительный элемент которых работает при гелиевых температурах, и в связи с этим требуют потребления больших мощностей. При создании мобильных и автономных устройств ВОД являются на сегодня единственно возможным типом датчиков.

Поместив «измерительное» волокно с покрытием из магнитострикционного материала в соленоид, можно применить такое устройство для измерения электрического тока. Измерить напряженность магнитного поля и электрический ток можно и без магнитострикционных преобразователей, а используя вращение плоскости поляризации световой волны в самом волокне (эффект Фарадея). ВОД на основе эффекта Фарадея применяются для детектирования магнитных полей с напряженностью от $8 \cdot 10^{-8}$ до $1,6 \cdot 10^6$ А/м, в частности, известны разработки для контроля тока в линиях электропередач (возможно измерение токов до 1000 А). Для увеличения чувствительности ВОД волокна легируют парамагнитными материалами с большими значениями постоянной Верде.

Для измерения электрических напряжений (соответственно, напряженности электрических полей) световолокно прикрепляют к пластине из пьезоэлектрического материала, деформирующейся при помещении ее в электрическое поле. Если пьезоэлектрический элемент снабдить контактами, то по изменению фазы светового пучка, проходящего через ОВ, можно судить о приложенном к ним электрическом напряжении. При использовании преобразователей пьезоэлектрического типа, связанных со световодом, получена чувствительность $2,3 \cdot 10^{-5}$ рад/(В/м).

Стекловолоконно, прикрепленное к пластине или стержню с большим коэффициентом теплового расширения, является чувствительным датчиком температуры. Такой датчик способен регистрировать температуры до 700°C с разрешающей способностью $2 \cdot 10^{-3}$ $^{\circ}\text{C}$. Нагрев одного из плеч интерферометра может осуществляться за счет пропускания тока через алюминиевое покрытие, нанесенное на световод. Поскольку изменение температуры световода обусловлено джоулевыми потерями электрической энергии в покрытии, то такой элемент может служить датчиком электрического тока. Минимально детектируемый им ток составляет примерно $5 \cdot 10^{-6}$ А при длине нагреваемого участка световода 1 м.

Возникновение фазового сдвига в световолокне под действием механических напряжений используется также для построения акселерометров. В качестве первичного преобразователя такого устройства применяются один или два световода, соединенных с инерционной массой (рис.10). Если ускорение прикладывается вдоль оси волокна, то изменение его относительной длины пропорционально ускорению. Используются также конструкции катушечного типа, когда вызванные ускорением изменения геометрических размеров упругого резинового цилиндра передаются намотанному на него световоду. В волоконно-оптических акселерометрах минимальное регистрируемое ускорение составляет менее 10^{-9} g.

Самостоятельный интерес представляют волоконно-оптические интерферометры (гироскопы), предназначенные для измерения угловых скоростей и углов поворота. Принцип действия таких устройств основан на

эффекте Саньяка, который состоит в том, что две электромагнитные волны, распространяющиеся навстречу друг другу по замкнутому пути (контур), пройдут его за разное время, если этот оптический контур вращается в инерциальном пространстве. В волоконно-оптическом гироскопе замкнутый контур представляет собой волоконно-оптическую петлю (катушку). На оба ее конца излучение лазерного источника посылают при помощи светоделителя (рис.11). После прохождения ОВ оба луча попадают на фотодетектор, а далее – на схему регистрации. Из измеренной разности фаз находят скорость вращения объекта, на котором закреплен оптический контур; интегрируя сигнал, получают угол поворота. Используя, например, суточное вращение Земли, определяют широту местности. Данное устройство можно применять также для навигации и стабилизации подвижных объектов. Волоконно-оптические гироскопы имеют явные преимущества по сравнению с механическими: малые габариты и вес, высокую надежность, работоспособность в условиях больших механических нагрузок, практически мгновенную готовность к работе, простоту технологии и низкую стоимость, ничтожное потребление энергии, наконец высокую чувствительность за счет использования многовитковых катушек световолокна (десятые – сотые доли градуса в час).

История развития волоконной оптики тесно связана с медициной. Хорошо известны такие элементы волоконной оптики, как фиберскопы – гибкие жгуты, предназначенные для наблюдения в труднодоступных местах и передачи изображения по криволинейным путям. Длина фиберскопа может достигать нескольких метров, а число волокон – миллиона на один квадратный сантиметр поперечного сечения. При необходимости освещения наблюдаемых объектов фиберскоп расчлениают на две части. Волокна, расположенные по периферии сечения жгута, объединяются и используются в качестве световода, передающего свет от внешнего источника к наблюдаемой поверхности. Центральные же волокна используются для передачи изображения.

Фиберскопы широко применяются в медицине для исследования внутренних органов человека: желудка, легких бронхов и др. Такие устройства получили название эндоскопов. Их можно использовать при диагностике

Рис. 11

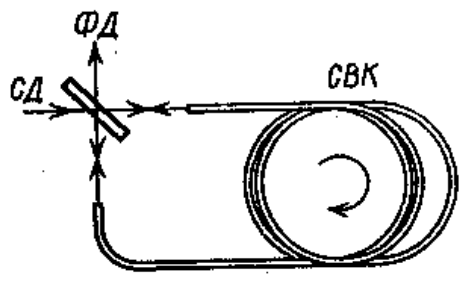
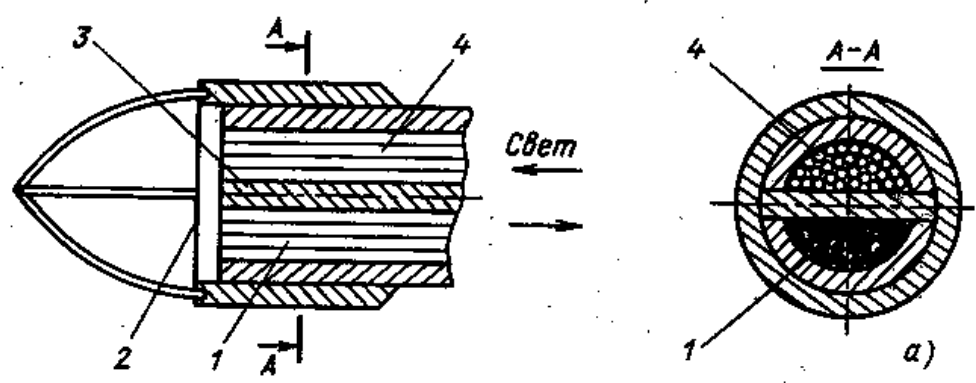


Рис.11. Принципиальная схема волоконно-оптического гироскопа.
СВК – световолоконная катушка.

Рис.12. Волоконно-оптический датчик для измерения давления в кровеносных сосудах.

Рис. 12



заболеваний внутренних органов и подкожных опухолей. В клинических условиях эти приборы целесообразно применять для непосредственного действия лекарств и препаратов, а также процессов, происходящих в тканях и кровеносных сосудах при попадании в них посторонних агентов. Так, например, дистанционный оксиметр-спектрофотометр, состоящий из волокон в тонком катетере, дает возможность характеризовать состояние крови (насыщение кислородом, окраска потока и т.д.) в живом организме путем измерения прямого или отраженного рассеянного оптического излучения. При этом можно также регистрировать частоту дыхания и сокращений сердца.

Уже первые образцы волоконно-оптических измерительных преобразователей давления отличались малыми размерами (≤ 1 мм), что позволяло вводить их в вены подопытных животных для измерения мгновенных значений давления крови. Конструкция этих преобразователей показана на рис.12. Мембраны 2 диаметром 1 мм и толщиной 18 мкм изготовлены из металлизированной полиэфирной пленки. Пучок осветительных волокон 4, соединенных с источником света, отделен от пучка приемных световодов 1 непрозрачной перегородкой 3. Торцы обоих световодных жгутов установлены на расстоянии около 50 мкм от светоотражающей поверхности мембраны: при этом световой поток, поступающий от осветительных световодов в приемные, зависит от прогиба мембраны под действием давления.

Лазеры с волоконно-оптическими зондами позволяют не только визуально наблюдать глубоко расположенные ткани, но и осуществлять выборочное прижигание тканей, не разрезая кожу. В частности, излучение рубинового лазера применено для остановки течения крови в сосудах.

Таким образом, использование волоконной оптики позволяет перевести обработку и передачу информации на качественно новый уровень, решать многие научно-технические задачи с новых позиций. Потребность в ВОД стремительно растет в связи с быстрым развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам.

систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам.

ПРИЛОЖЕНИЕ

*Шторочный ВОД.

Одним из наиболее изученных разрывных ВОД интенсивности является шторочный датчик (рис.1). Механизм действия этого прибора заключается в том, что световой поток, выходящий из волокна 1 в пространство между торцами волокон 1 и 5, частично перекрываются подвижной шторкой 4, жестко скрепленной с гибким элементом (мембраной) 3 (2 – корпус). При перемещении мембраны шторка модулирует интенсивность световой волны, попадающей в выходное волокно.

Основной характеристикой датчика является чувствительность

$$dT/dp = dT/dx \cdot dx/dp, \quad (1)$$

показывающая, насколько сильно меняется коэффициент оптического пропускания при единичных изменениях давления p , прикладываемого к мембране. Второй множитель в выражении (1) в основном определяется конструкцией механических частей датчика, преобразующих изменения внешнего давления в механические смещения. Эта конструкция может содержать элементы, позволяющие усилить или ослабить внешнее воздействие, а также оптимизировать конструкцию применительно к конкретным условиям (например, для работы в разреженных средах, т.е., в устройствах типа микрофона, или в жидкостях – гидрофонный режим). Конструкция механической части датчика в большой степени определяет достижимые предельные параметры ВОД ($\Delta z = 100 \text{ мкм}$):

- 1) минимально измеряемое смещение $\Delta x \approx 6 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$;
- 2) передаточная функция $dT/Dx \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$;
- 3) минимально обнаружимое давление $\Delta p \approx 65 \text{ дБ/мкПа}$;
- 4) частотный диапазон $\Delta f = 20 - 1000 \text{ Гц}$.

**Фазовый ВОД на основе интерферометра Маха-Цендера – гидрофон.

Лазерное излучение в датчике (рис.2 а) делится полупрозрачным зеркалом на две части, одна из которых направляется в одномодовый световод, расположенный в зоне измерения, например в подводном звуковом поле. Другая часть излучения пропускается через контрольный световод, изолированный от влияния внешних воздействий. Результирующий интерференционный сигнал на светочувствительной поверхности фотоприемника зависит от разности оптических путей, проходимых излучением в двух плечах интерферометра. Фототок приемника

$$I = P_0 TS [1 + \cos(\Delta\phi)],$$

где P_0 – мощность излучения лазера; T – коэффициент пропускания оптического канала; S – коэффициент чувствительности фотоприемника; $\Delta\phi$ – изменение фазы световой волны, обусловленное внешним воздействием на световод. Основной вклад в изменение фазы вносит изменение длины световода.

При использовании источника излучения с длиной волны 0,5145 мкм и ВС длиной 4 м и диаметром 2,5 мкм была достигнута чувствительность 40 – 180 дБ//1В/мкПа.

Для расширения частотного диапазона (свыше 100 кГц) фазосдвигающих элементов, применяемых в датчике, используются полые акустические резонаторы, вдоль оси которых располагается ВС. В качестве среды, связующей полый акустический резонатор со световодом, можно применить минеральное масло (рис.2 б). Такая конструкция при толщине цилиндра из PZT – керамики 0,56, длине 13,0 и диаметрах 3,2 и 6,0 мм позволяет расширить рабочий диапазон частот ВОД до 5 МГц.

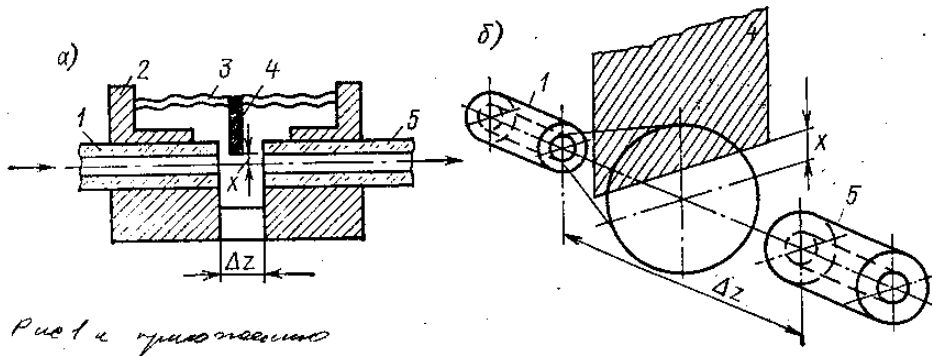
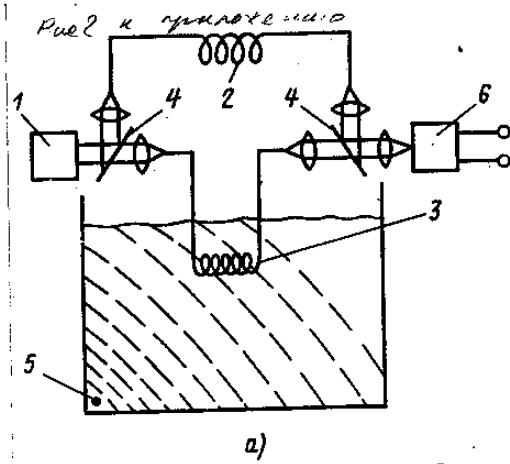


Рис. 1 к рис. 1



a)

b)