

Оптоэлектронный дистанционный измеритель давления на основе многослойных оптических структур

Александр ОВЧИННИКОВ
Евгений МАКАРЕЦКИЙ
admin_telex@mail.ru

Предложенный авторами оптоэлектронный дистанционный измеритель давления с первичным преобразователем на основе многослойных оптических структур обладает высокой чувствительностью и позволяет осуществлять дистанционные измерения.

Введение

Измерение давления является важной задачей во многих отраслях науки и техники.

Большинство потоков носит турбулентный характер. При этом давление постоянно изменяется. Поэтому актуальной является задача измерения не только среднего во времени, но и мгновенного значения давления.

Применяемые методы измерения давления должны соответствовать сложному характеру исследуемого объекта, а измерительные преобразователи — удовлетворять жестким требованиям — обладать высокой чувствительностью при необходимом пространственном разрешении. Этим условиям соответствуют оптические методы измерения на основе волоконно-оптических устройств.

Основной элемент таких устройств — оптический волновод, который является не только линией передачи, но и чувствительным к изменению давления элементом. Существует большое количество устройств на основе световодов [1, 2], в которых используются различные физические явления. Об измеряемой величине (давлении) в таких устройствах обычно судят по изменению мощности (амплитуды) и поляризации проходящего через чувствительный элемент света.

При наличии положительных качеств (достаточно большая чувствительность, высокая помехозащищенность и т. д.) данные устройства имеют и один существенный недостаток: они не позволяют производить дистанционные измерения, когда первичный преобразователь физически не связан с остальными элементами измерительной системы.

Избавиться от этого недостатка позволяет разработка первичных преобразователей для измерения давления, использующих особенности интерференционных явлений в мно-

гослойных оптических структурах (МОС) при больших углах падения.

Многослойные оптические структуры, представляющие собой в общем виде систему чередующихся прозрачных оптических сред с различными параметрами (в первую очередь — показателем преломления), при определенных углах падения когерентного света обладают ярко выраженными свойствами резонансной угловой фильтрации [3]. Типичная угловая характеристика пропускания резонансных многослойных оптических структур (РМОС) изображена на рис. 1.

Угловая чувствительность данных устройств может достигать $10^{-3} \dots 10^{-4}$ угловой секунды [4].

Создание первичных преобразователей давления на основе многослойных оптических структур сопряжено с необходимостью обеспечения условий для изменения коэффициента пропускания (или отражения)

структуры в зависимости от воздействующего на преобразователь давления.

Принципы построения преобразователей давления на основе многорезонансных оптических структур

Измерительные преобразователи давления воздуха (или других газов) и акустических колебаний могут быть созданы на основе двух различных принципов:

- 1) Изменение показателя преломления одного или нескольких слоев; в этом случае некоторые из слоев имеют воздушное (или газовое) заполнение и сообщаются с измеряемой средой; изменения давления приводят к изменениям показателя преломления слоя.
- 2) Изменение толщины одного или нескольких слоев; такая РМОС имеет мембранную

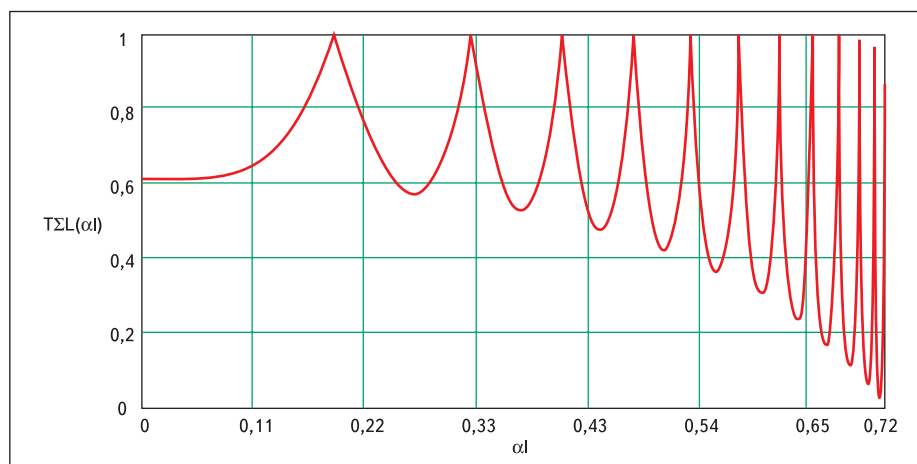


Рис. 1. Расчетная характеристика зависимости оптического пропускания РМОС от угла падения излучения в режиме угловой фильтрации

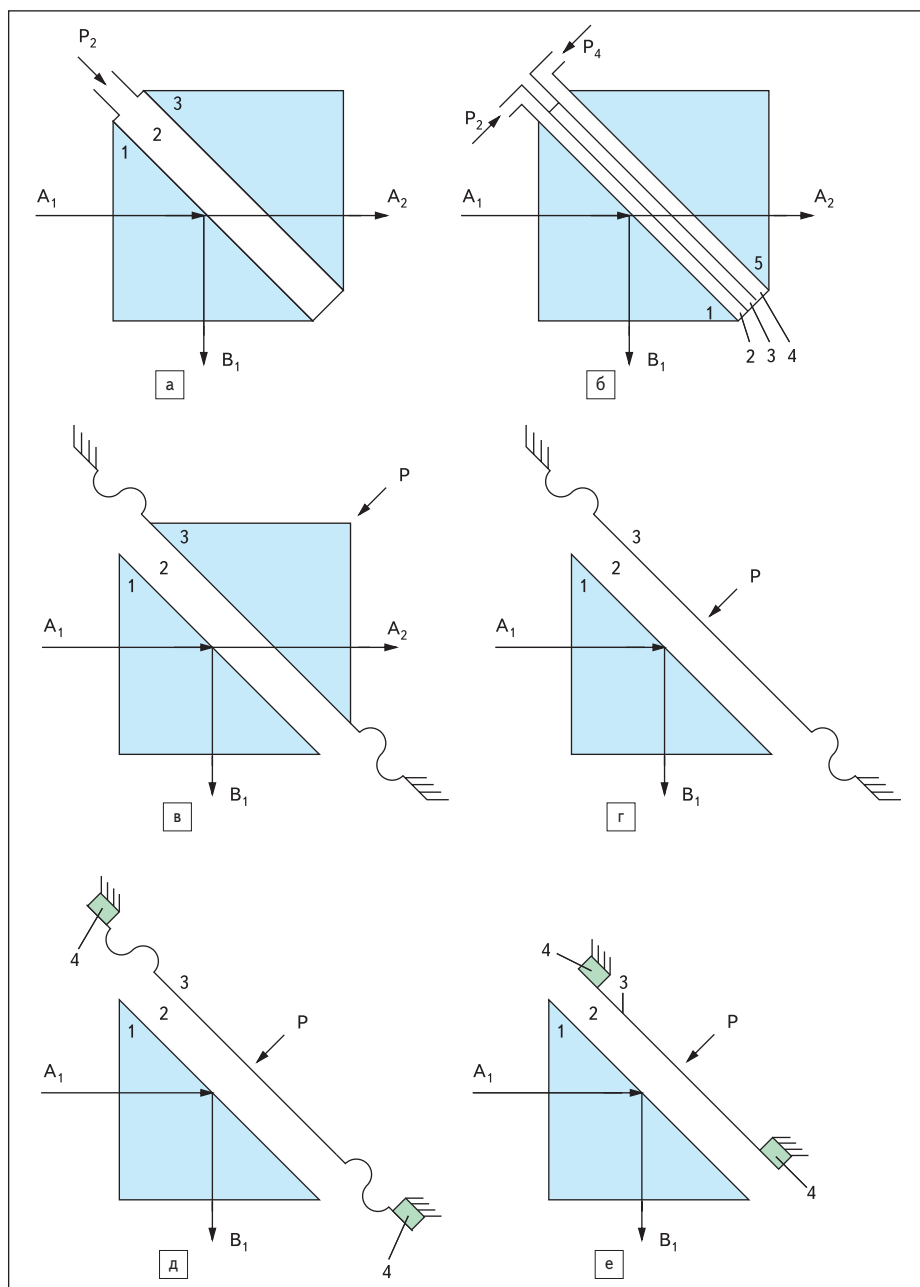


Рис. 2. Варианты конструкции измерительных преобразователей давления и акустических колебаний

структуру, и изменение давления приводит к равномерному или неравномерному закону распределения толщины резонансного слоя по апертуре.

Первый метод применим только для измерения давления, а вторым можно измерить как давление, так и акустические колебания. Независимо от конкретного метода, изменение параметров РМОС приводит к изменению оптического пропускания структуры и, соответственно, выходного сигнала фотоприемника.

Анализ свойств РМОС позволяет предложить несколько вариантов конструкции измерительных преобразователей давления воздуха и акустических колебаний (рис. 2).

Измерительный преобразователь (рис. 2а) представляет собой проходную или отража-

тельную РМОС с постоянной толщиной резонансного зазора, в котором находится газ. Основным достоинством такого преобразователя является отсутствие подвижных частей конструкции.

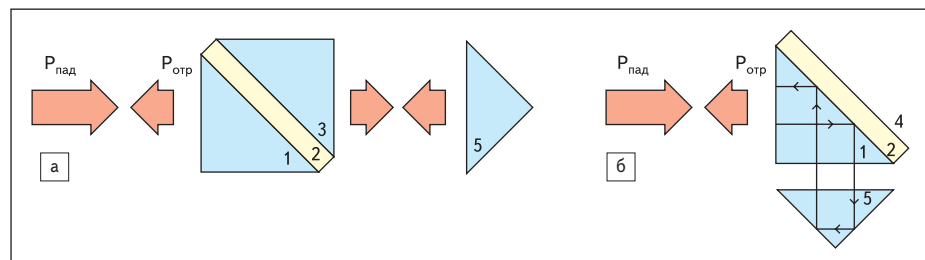


Рис. 3. Схемы отражательных датчиков на основе проходной (а) и режекторной (б) РМОС (1, 3 — входная и выходная призмы соответственно; 2 — резонансный зазор; 4 — мембрана; 5 — трипель-призма)

Дифференциальный преобразователь (рис. 2б) содержит две камеры, представляющие собой слои с полным внутренним отражением (ПВО), в которых присутствуют газ с давлением P_2 (слой 2) и P_4 (слой 4). Разделительная мембрана 3 выполнена из оптически прозрачного материала и служит резонансным слоем. Изменение давлений P_2 , P_4 приводит к изменению толщины слоев с ПВО и, соответственно, пропускания (волна A_2) и отражения (волна B_1) структуры.

Преобразователь (рис. 1в) представляет собой РМОС с изменяющейся толщиной резонансного слоя d_2 . Подобный датчик способен измерять как давление газов, так и любое механическое давление, приложенное к датчику и приводящее к смещению призмы 3. Информация о давлении (изменении толщины зазора) может быть получена как по отраженной, так и по проходящей волнам.

Мембранный преобразователь (рис. 2г) представляет собой отражательную РМОС с изменяющейся толщиной резонансного слоя. По сравнению с предыдущей конструкцией (рис. 2в) она имеет существенно меньшую массу подвижной части, что позволяет использовать ее для измерения акустических колебаний. Мембрана 3 должна иметь поверхность с высоким коэффициентом отражения и обладать достаточно высокой плоскостностью.

Конструкция, представленная на рис. 2д, является модификацией предыдущего варианта преобразователя. Основное ее отличие — в расположении подвижной мембраны 3 на пьезопреобразователях 4, которые позволяют изменять толщину резонансного слоя d_2 . Благодаря такой конструкции можно регулировать диапазон (и чувствительность) преобразователя, а также использовать компенсационный метод измерения.

Преобразователь с неравномерным прогибом мембраны (рис. 2е) характеризуется возможностью формирования близкого к линейному закону изменения оптического пропускания в зависимости от приложенного давления.

Новые функциональные возможности обеспечивает дополнение конструкций, представленных на рис. 3, элементами для возврата выходного излучения в направлении на передатчик. Использование отражательных датчиков позволяет выполнить более

компактными блоки генерации и обработки, а также обеспечить дистанционность измерений. Кроме того, в этом случае возможен двойной проход оптического излучения через РМОС, что повышает чувствительность измерительного преобразователя (рис. 3).

Математические модели первичных преобразователей давления

Определим математические модели датчиков на основе перечисленных базовых элементов. Основным эффектом воздействия давления на датчики — изменение показателя преломления или толщины резонансного слоя, приводящее к изменению оптического пропускания (отражения) структуры.

Если не учитывать оптические потери в структуре, коэффициенты прохождения T и отражения $|\Gamma|^2$ регулярной структуры в области каждого одного резонанса описываются выражениями [4]:

$$T = 1/(1+y^2); \quad |\Gamma|^2 = y^2/(1+y^2), \quad (1)$$

где: $y = \varepsilon N$ — обобщенная расстройка РМОС от резонансного состояния; $\varepsilon = (\partial r_{\Sigma}/\partial c)\Delta c$ — абсолютная фазовая расстройка; c — модулируемый параметр; N — усиление резонансного слоя, r_{Σ} — суммарный фазовый набег в резонансном слое на длине одного зигзага парциальной волны.

Усиление резонансного слоя N для РМОС определяется выражением:

$$N = (1 - |\Gamma_{21}| \times |\Gamma_{23}|)^{-1}, \quad (2)$$

где $|\Gamma_{21}|$, $|\Gamma_{23}|$ — модули коэффициентов отражения от границ раздела сред 2-1 и 2-3 соответственно. Для симметричных структур данные коэффициенты равны.

Коэффициент отражения электромагнитной волны от границы раздела сред 2-1 определяется выражением [4]:

$$|\Gamma_{21}| = \left| \frac{K_{z2} - K_{z1}}{K_{z2} + K_{z1}} \right|, \quad (3)$$

где $K_{zi} = \sqrt{K_x^2 - K_y^2} = \sqrt{K_o^2 n_i^2 - K_x^2}$ — поперечное (относительно границы раздела) волновое число в i -й среде, K_x — продольное волновое число, $K_o = 2\pi/\lambda_o$ — волновое число, λ_o — длина волны, n_i — показатель преломления i -й среды.

Суммарный фазовый набег в слое определяется выражением

$$r_{\Sigma} = r_{21} + r_{23} - 2K_{z2}d_2 = 0 - 2\pi t. \quad (4)$$

При этом фазовые сдвиги при отражении от границ раздела 2-1 и 2-3 (r_{21} и r_{23} соответственно) равны нулю или π в зависимости от поляризации излучения [4].

Датчики давления на основе регулярных РМОС с изменяемым показателем преломления

При изменении показателя преломления резонансного слоя фазовая расстройка в этом случае равна

$$\varepsilon = \frac{\partial r_{\Sigma}}{\partial n_2} \Delta n_2 = -\frac{2K_{z2}^2 d_2}{K_{z2}} \times \frac{\Delta n_2}{n_2}, \quad (5)$$

где Δn_2 — изменение показателя преломления, вызываемое изменением давления среды.

На основе РМОС с изменяемым показателем преломления возможно создание проходных и отражательных датчиков.

Для отражательных структур выражение для обобщенной расстройки проходной РМОС при изменении показателя преломления резонансного слоя принимает вид:

$$y \approx \frac{K_2 K_{z1} d_2^3}{(\pi t)^2} \times \frac{\Delta n_2}{n_2}, \quad (6)$$

где $t = 1, 2, 3, \dots$ — номер резонанса.

Как видно из выражений (5) и (6), при изменении показателя преломления резонансного слоя расстройка (и, соответственно, чувствительность) быстро возрастают с увеличением толщины резонансного слоя.

Датчики давления на основе режекторной РМОС с изменяющейся толщиной резонансного слоя

Коэффициент отражения от структуры $|\Gamma|^2$ определяется соотношением (1). Однако параметр фазовой расстройки ε в этом случае описывается выражением:

$$\varepsilon = \frac{\partial r_{\Sigma}}{\partial (d_2)} \times \Delta d_2 \quad (7)$$

и выражение для обобщенной расстройки РМОС принимает вид:

$$y = -K_{z1} \Delta d_2 = -K_{z1} d_2 \frac{\Delta d_2}{d_2}. \quad (8)$$

Оценка чувствительности оптоэлектронных датчиков

Анализ процессов в оптоэлектронных датчиках давления показывает, что они по принципу действия могут быть отнесены к оптическим системам пеленгации по методу сканирования диаграммы направленности.

Точность отсчета угла в этом случае, определяющая общую предельную погрешность системы измерения, может быть рассчитана по формуле [5]:

$$\sigma_{\alpha}^2 = - \left[2\mu \frac{d_2}{d\alpha^2} \Psi_T(\alpha) \Big|_{\alpha=0} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где σ_{α}^2 — дисперсия оценки отсчета угла; μ — соотношение «сигнал-шум» на входе прием-

ника; $\Psi_T(\alpha)$ — корреляционная функция диаграммы направленности $T(\alpha)$, которая рассчитывается по соотношению:

$$\Psi_T(\alpha) = c \left| \int_{-\infty}^{+\infty} T(\alpha') T(\alpha - \alpha') d\alpha' \right|, \quad (10)$$

где c — нормирующий множитель для обеспечения $\Psi_T(0) = 1$.

При аппроксимации угловой характеристики РМОС функцией Гаусса [4]:

$$T(\alpha) = \exp \left[-\frac{\pi \alpha^2}{2\Delta^2} \right], \quad \Delta = 1,5/Q,$$

где Q — угловая добротность РМОС, равная $Q = K_x L_0$; L_0 — постоянная длины РМОС, зависящая от толщины резонансного зазора d_2 и других параметров [3], корреляционная функция диаграммы направленности принимает вид:

$$\Psi_T(\alpha) = \exp \left(-\frac{\pi \alpha^2 Q^2}{9} \right) \quad (11)$$

и дисперсия погрешности отсчета угла составляет

$$\sigma_{\alpha}^2 = 2,25/\pi\mu Q^2. \quad (12)$$

Оценка показывает, что предельное разрешение по углу датчиков (при отношении «сигнал-шум» на входе, равном $\mu = 10^3$) составляет $\sigma_{\alpha}^2 = 2,86 \times 10^{-15}$ рад², а среднеквадратическая погрешность оценки угла — $\sigma_{\alpha} = 5,3 \times 10^{-8}$ рад, то есть приблизительно 10^{-2} угловой секунды.

Относительная дисперсия оценки смещения подвижной диафрагмы датчика σ_{α}^2 с учетом соотношения (8) соответственно равна

$$\sigma_{\alpha}^2 = 0,18/\mu Q^2. \quad (13)$$

Последнее соотношение справедливо для случая установившихся пространственных переходных процессов в РМОС, то есть при выполнении условия $a/L_0 \gg 1$, где a — диаметр пучка на входе.

Анализ показывает, что при апертуре датчика $a = 50$ мм и толщине резонансного зазора $d_2 = 10$ мкм, погрешность оценки смещения мембраны составляет менее 10^{-7} мкм, что позволяет достигнуть чувствительности предложенных оптоэлектронных датчиков на несколько порядков выше, чем для электродинамических преобразователей, и в 10–50 раз выше, чем для волоконно-оптических датчиков с преобразователем типа интерферометра Фабри-Перо [1].

Результаты экспериментального исследования первичных преобразователей давления

Экспериментально исследовались мембранные преобразователи отражательного типа

(рис. 2г, д) с воздушным заполнением зазора между призмой с показателем преломления $n_1 = 1,51$ и подвижной мембраной, выполненной из металлизированной полимерной пленки толщиной $d = 0,03$ мм. Толщина резонансного зазора составляла $d_2 = 10$ мкм. Экспериментальные конструкции показали высокие параметры по чувствительности и возможность работы на удалении от источника излучения до нескольких метров.

По результатам измерений средняя чувствительность датчика, определяемая изменением коэффициента отражения датчика по мощности на 100% при изменении воздействующего на датчик давления, составляет $N = 0,85-0,95 Па^{-1}$.

Для повышения чувствительности датчика необходимо уменьшать толщину мембраны или изготавливать ее с гофром, обеспечивающим свободные колебания, либо с иными конструктивными особенностями мембраны и применяемых для ее изготовления материалов.

Заключение

Предложенные принципы работы оптических датчиков давления на основе многослойных резонансных углоизбирательных структур обладают высокой чувствительностью и возможностью осуществления дистанци-

онных измерений. В то же время, характеристика преобразования датчиков нелинейна, их характеристики существенно зависят от температуры, что повышает погрешность измерения и усложняет их применение. Для устранения этих недостатков в настоящее время авторами разрабатываются «интеллектуальные» цифровые датчики, включающие микроконтроллерную систему преобразования измерительных сигналов. ■

Литература

1. Граттан К. Т. В. Волоконно-оптические датчики и измерительные системы // Датчики и системы. 2001. № 3.
2. Гришачев В. В., Брюховецкий О. С., Мандель А. М., Родионов В. Н. Волоконно-оптический датчик акустических волн с голографическим преобразователем // Датчики и системы. 2002. № 11.
3. Соколовский И. И., Покровский Ю. А. Прикладная радиооптика. Теория и методы резонансной угловой фильтрации. Киев: Наукова думка. 1986.
4. Васин С. А., Покровский Ю. А., Макарецкий Е. А. Методы аналитического синтеза информационно-измерительных и информационно-управляющих устройств и систем с двусторонней памятью. Тула: ТулГУ. 1999.
5. Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. М.: Советское радио. 1970.