

ВКВО-2011

ДАТЧИКИ УТЕЧЕК ГАЗА НА ОСНОВЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ВОЛОКОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

Туртаев С.Н., Беловолов М.И., Зайнуллин Э.Ф.

Содержание

- 1. Введение
- 2. Обнаружение (условия для наблюдения)
- 3. Свойства и проявления в волоконных световодах и интерферометрах
- 4. Теоретическое описание и объяснение ТА-эффекта
- 5. Возможные применения (датчики и функциональные устройства)
- 6. Заключение

bmi@fo.gpi.ru

звук решаетвсе

СИСТЕМА 🗿 begisoudo. И ГОД БЕСПЛАТНОЙ МУЗЫКИ ОТ UNIVERSAL MUSIC ТОЛЬКО НА КОМПЬЮТЕРАХ НР.

Купите компьютер HP для развлечений и присоединяйтесь к HP Music club!. (intel) inside CORE 15

Умный. И это видно.

Everybody On

hpmusic.ru

Coperations

System configuration for pipeline leakage detection



Акустический сигнал (шум) дырки в трубе при 5 атм



Схема эксперимента



Схема установки









<u>Акустические АЧХ многовитковых элементов (Ø 10 см, L = </u>

10 м) из типовых оптических волокон и кабелей



Запись акустического сигнала при термоакустическом

эффекте и мгновенный спектр звука на 4 кГц



Рука экспериментатора, поднесенная к виткам-датчикам



Спичка, зажженная около витков-датчиков

акустических сигналов



<u> ВОЛП – 1 (d = 250 мкм, акрилат)</u>



<u>ВОЛП - 2 (900 мкм, ПВХ)</u>



ВОЛП-3 (900 мкм, ПВХ, кабель 3 мм)



ВОЛП - 4 (900 мкм, ПВХ, кабель 5 мм)



<u>ВОЛП - 2, f = 1 кГц</u>



<u>ВОЛП - 2, f = 15 кГц</u>



<u>Динамика нагрева и охлаждения плеча с ВОЛП-2</u>





Теоретический анализ

$$E(x, y, z, t) = E(x, y) \exp\left[j\left(\omega_0 t + \phi_0 + \int_0^z \beta(s, t) ds\right)\right], \qquad (1)$$

$$\Delta \varphi(t) = \Delta \varphi_1 + 2 \cdot \int_{z_0}^{z_0 + L} \beta(s, t) ds, \qquad (2)$$

где $\Delta \phi_1$ – постоянная составляющая разности фаз.

При изотропном акустическом и тепловом воздействии на ОВ

$$\beta(z,t) \approx \beta(z,0) + \frac{\partial \beta}{\partial p}(z,0) \cdot \delta p(z,t) + \frac{\partial \beta}{\partial T}(z,0) \cdot \delta T(z,t).$$
(3)

Подставляя (3) в (2) и включая независящие от t слагаемые в $\Delta \phi_1$ получим;

$$\Delta \varphi(t) \approx \Delta \varphi_1 + \delta \varphi_p(t) + \delta \varphi_T(t), \qquad (4)$$

где

$$\delta \phi_{p}(t) = 2 \cdot \int_{z_{0}}^{z_{0}+L} \frac{\partial \beta}{\partial p}(s,0) \cdot \delta p(s,t) ds \approx 2 \cdot \frac{\partial \beta}{\partial p}(0,0) \int_{z_{0}}^{z_{0}+L} \delta p(s,t) ds,$$
(5)

$$\delta \phi_{T}(t) = 2 \cdot \int_{z_{0}}^{z_{0}+L} \frac{\partial \beta}{\partial T}(s,0) \cdot \delta T(s,t) ds \approx 2 \cdot \frac{\partial \beta}{\partial T}(0,0) \int_{z_{0}}^{z_{0}+L} \delta T(s,t) ds, \qquad (6)$$

$$\delta p(z,t) = \delta p_0(z) \cdot \sin \omega t, \qquad (7)$$

где δр₀ – амплитуда звукового давления в точках прохождения OB, ω частота акустической волны.

Подставляя (7) в (5) получим

$$\delta \varphi_{p}(t) \approx \left[2 \cdot \frac{\partial \beta}{\partial p}(0,0) \int_{z_{0}}^{z_{0}+L} \delta p_{0}(s) ds \right] \cdot \sin \omega t = \varphi_{p0} \sin \omega t .$$
(8)

$$\delta \phi_{p0} << 2\pi.$$

22

(9)

Локальный нагрев.

δT(z,t) не является знакопеременной по длине OB, и воздействие на фазу интерферометра не будет усредняться. Поэтому за время τ измерения одиночного спектра сигнала на выходе интерферометра вполне возможна ситуация

$$\delta \varphi_{\mathrm{T}}(t+\tau) - \delta \varphi_{\mathrm{T}}(t) >> 2\pi.$$
(10)

Если за время τ можно ограничиться линейным по времени приближением для зависимости δT(z,t) от t, то с точностью до независящего от времени слагаемого получим из (6):

$$\delta \phi_{\rm T}(t) \approx \Omega t$$
, rge $\Omega = 2 \cdot \frac{\partial \beta}{\partial T} (0,0) \int_{z_0}^{z_0 + L} \cdot \frac{\partial (\delta T)}{\partial t} (s,0) ds$. (11)

Таким образом, суммарная разность фаз (4) состоит из независящего от времени слагаемого, малого слагаемого вида (8), пропорционального усредненному по ОВ звуковому давлению, а также приблизительно линейно зависящего от времени слагаемого (11), которое за время т может быть много больше, чем 2*π*.

Оценки:

 $\Delta \phi / (\Delta T \cdot L) \cong 100 \text{ рад} / ^{\circ}C \cdot M$

 $\Delta \phi / (\Delta P \cdot L) \cong - 4 \cdot 10^{-5} \text{ рад/Па·м}$

(G.B.Hocker. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. Appl.Optics, 1979, Vol.18(9), 1445-1448)

 $\Delta \phi_{\rm T} = 1000$ рад ~ 300 периодов биений (полос), при $\Delta T = 1$ °C, L = 10 м $\Delta \phi_{\rm p} \leq -10^{-4}$ рад << 2 π , при $\Delta P = 0,2$ Па (80 дБ), L = 10 м

B.J.White, et.al., Optical-Fiber Thermal Modulator, IEEE J. of Lihtwave Techn., 1987, Vol.LT-5(9), 1169-1175.



Fig. 3. Interference fringes (upper trace) produced when a 0- to 41.5-mA square wave (lower trace) was applied to a 3.2-cm-long gold-coated bare fiber.





Рабочая характеристика интерферометра является нелинейной и имеет вид

$$U(t) \sim I_{c} + I_{o} + 2\sqrt{I_{c}I_{o}} \cdot \cos(\Delta\varphi(t)), \qquad (12)$$

где I_c и I_o – мощности опорной и сигнальной мод на входе Хразветвителя соответственно. Подставляя (4) в (12), опуская независящую от времени составляющую фазового сдвига (что эквивалентно выбору начала отсчета времени), и учитывая, что из (9) имеем приближенные равенства

$$\sin \delta \phi_{p}(t) \approx \delta \phi_{p}(t), \quad \mathbf{H} \quad \cos \delta \phi_{p}(t) \approx 1,$$
(13)

для переменной составляющей напряжения на выходе детектора интерферометра получим:

$$\widetilde{U}(t) \sim 2\sqrt{I_c I_o} \cdot \left[\cos \delta \varphi_T(t) + \delta \varphi_p(t) \sin \delta \varphi_T(t)\right].$$
(14)

Подставляя в (14) выражения (8) и (11), для рассматриваемого случая одновременного гармонического акустического воздействия и нагрева участка OB, получим:

 $\widetilde{U}(t) \sim 2\sqrt{I_c I_o} \cdot \left[\cos \Omega t + \delta \phi_{p0} \sin \omega t \sin \Omega t \right] =$

$$=2\sqrt{I_{c}I_{o}}\cdot\left[\cos\Omega t+\frac{\delta\varphi_{p0}}{2}\cos[(\omega-\Omega)t]-\frac{\delta\varphi_{p0}}{2}\cos[(\omega+\Omega)t]\right].$$
 (15)

На спектре: 1 – новая частота Ω

2 – расщепление на 2 частоты : (ω-Ω) и (ω+Ω) ! Эффект – нелинейная модуляционная характеристика волоконного интерферометра.

Спектр акустического сигнала при ТА-эффекте: расщепление основной частоты звука на 4 кГц и разностная частота Ω(t)



Звук «решает» все Гармонический звук на любой частоте в пределах АЧХ позволяет измерять температуру по расщеплению Ω(t)

Основа мультиплексирования многих датчиков с частотным разделением



Заключение

1. Впервые экспериментально обнаружено, что при воздействии гармонического акустического сигнала с частотой ω на измерительное плечо интерферометра Майкельсона, и одновременном нагреве/охлаждении участка измерительного плеча, на спектре выходного сигнала интерферометра наблюдается расщепление гармоники с частотой ω на две спектральные составляющие $\omega \pm \Omega(t)$, где зависимость $\Omega(t)$ является медленной, с характерным временем и динамикой нагрева/остывания оптического волокна (OB).

2. Обнаруженный термоакустический эффект объясняется нелинейностью рабочей характеристики интерферометра и наличием двух составляющих разности фаз: «медленной», изменением оптического пути обусловленной В измерительном плече 3**a** счет нагрева/охлаждения, и быстрой – за счет модуляции разности фаз из-за воздействия акустического сигнала на ОВ. Величина расщепления регистрируемой частоты звука $\Delta \omega = 2\Omega(t)$ определяется скоростью смещения рабочей точки интерферометра, вызванной изменением локального нагрева волокна в измерительном плече интерферометра. Показана возможность отдельной регистрации основной частоты Ω(t) термического воздействия в спектре комбинированного акустического сигнала интерферометра.

3. Термоакустический эффект в волоконных интерферометрах с удобным для измерений частотным откликом может использоваться для создания высокочувствительных (∆T ~ 0,001 – 1 оС) распределенных и локальных волоконных датчиков и регистраторов быстрых изменений температурных режимов работы механизмов и технологических процессов, для регистрации аварийных и техногенных процессов на трубопроводах и коммуникациях, сопровождающихся изменением температуры, а также механических изменяемых напряжений, модулирующих оптический путь сигналов в измерительном плече интерферометра.

4. Возможность расщепления частотного спектра регистрируемых сложных акустических сигналов необходимо учитывать при обнаружении и распознавании источников звука по их частотным портретам.