

03;09.5;15

Волоконно-оптический частотный датчик переменного давления в газообразных и жидких средах

© Ф.А. Егоров¹, В.Т. Потапов¹, М.А. Мелькумов², В.В. Амеличев³,
С.С. Генералов³, С.В. Шаманаев³

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская обл., Фрязино

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

³ Научно-производственное предприятие «Технология», Москва, Зеленоград, МИЭТ

E-mail: egorov-fedor@mail.ru, generalserg89@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 ноября 2015 г.

Предложены и реализованы волоконно-оптические частотные датчики переменного давления, основанные на автомодуляционных режимах генерации волоконных лазеров с микрооптомеханическими резонансными структурами. Рассмотрены возможности регистрации звукового давления в газообразных и жидких средах, получены оценки чувствительности рассматриваемых датчиков.

Автомодуляционные режимы генерации волоконных лазеров (ВЛ) с микрооптомеханическими резонансными структурами (МОМРС, микроосциллятор) [1,2] открывают возможности для создания автогенераторных волоконно-оптических датчиков (ВОД) с частотным выходом (F), в которых роль сенсорного элемента (СЭ) играет микроосциллятор с резонансной частотой (f), зависящей от различных внешних воздействий (полей). Модуляция частоты автоколебаний $\tilde{F} \approx f(t)$ под действием переменного поля (с частотой Ω) позволяет определить характеристики измеряемого поля путем обработки сигналов в „высокочастотной“ области ($f \gg Q$), что способствует повышению соотношения сигнал/шум в измерительных системах [3], при этом возможность возбуждения автоколебаний при весьма умеренных значениях механической добротности МОМРС $Q \geq 10$, соответствующих микроосцилляторам, находящимся в достаточно плотных газообразных или жидких средах, существенно расширяет условия и области применений рассматриваемых ВОД. В этой связи лазерные системы ВЛ–МОМРС

представляют большой интерес как основа для разработки частотных датчиков переменного давления (ВОДД), открывающих, в частности, перспективы создания многоканальных волоконно-оптических микрофонов (гидрофонов) с частотным разделением измерительных каналов, которым благодаря частотной форме представления измеряемой величины присущи высокая помехозащищенность и большой динамический диапазон измерений [4].

Цель данной работы — исследование возможности создания ВОДД. Схема ВОДД на основе ВЛ–МОМРС представлена на рис. 1. Лазерная система реализована с помощью иттербиевого (Yb^{+3}) ВЛ и кремниевой МОМРС монолитной конструкции с топологией „микробалка на мембране“, играющей роль СЭ оптоволоконного преобразователя давления (ОПД). Отметим, что современные групповые технологии микросистемной техники позволяют создавать подобные МОМРС–СЭ из широкого круга материалов [5]. Миниатюрный ВЛ на основе одномодового Yb -активного световода (АС) с накачкой в сердцевину (с длиной волны излучения $\lambda_p \approx 976 \text{ nm}$) имеет полную длину не более 45 mm и характеризуется частотой релаксационных колебаний в пределах $f_{rel} \approx 10\text{--}600 \text{ kHz}$, средней выходной мощностью лазерного излучения, достигающей $\bar{P}_s \approx 10 \text{ mW}$, которые обеспечивают условия резонанса ($f_{rel} \cong f$) и возможность реализации синхронных автоколебаний в ВЛ–МОМРС. В лазерном резонаторе МОМРС играет роль внешнего отражателя, который совместно с полупрозрачным зеркалом — тонкопленочной структурой на торцевой поверхности АС, формирует нелинейный интерферометр Фабри–Перо (NLIFP), играющий роль одного из зеркал ВЛ. В качестве второго зеркала используется волоконная брэгговская решетка (FBG), прозрачная на длине волны накачки АС, но полупрозрачная на линии лазерной генерации $\lambda_s \approx 1030 \text{ nm}$ и с коэффициентами пропускания и отражения $T_s \approx 10\%$, $R_s \approx 90\%$, что позволяет контролировать динамику интенсивности I_s лазерного излучения в ВЛ–МОМРС $U(t) \sim I_s(t)$. Для демодуляции частотно-модулированного сигнала $U(t)$ можно использовать резонансный контур, настроенный на частоту $f_k \approx f(1 \pm \frac{1}{Q_k})$, близкую к собственной частоте микроосциллятора, Q_k — добротность контура; компенсация нестабильностей амплитуды сигнала $U(t)$ осуществляется с помощью автоматического регулятора усиления (АРУ).

Основными элементами рассматриваемой МОМРС являются колебательное звено распределенного типа (микроосциллятор) в виде

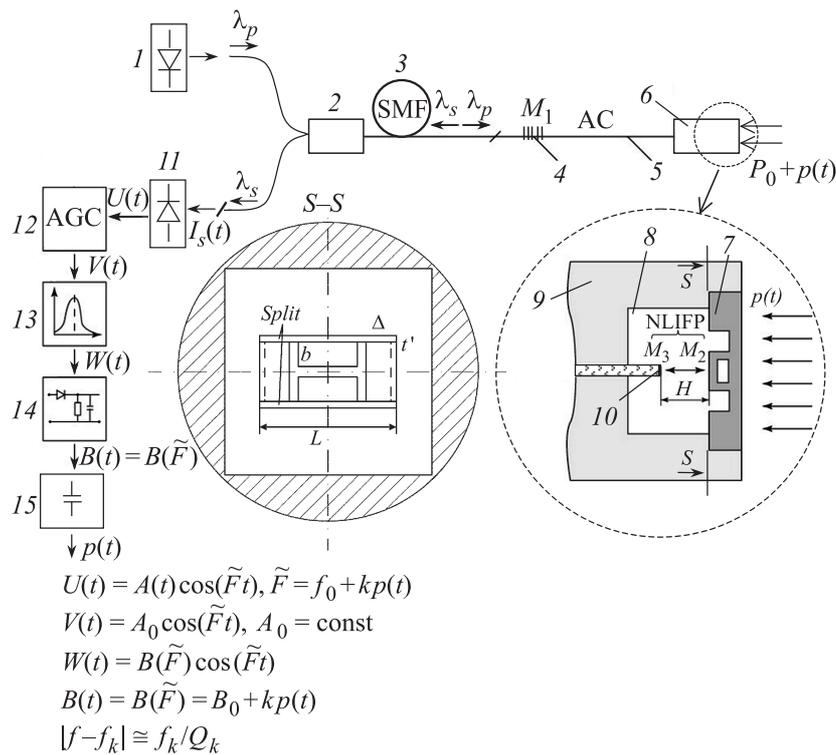


Рис. 1. Схема автогенераторного волоконно-оптического датчика переменного давления: 1 — полупроводниковый лазер накачки ($\lambda_p = 976 \text{ nm}$); 2 — WDM-980/1060; 3 — SMF-1060; 4 — FBG ($\lambda_{\text{FBG}} \approx 1030 \text{ nm}$; $\Delta\lambda_{\text{FBG}} \leq 0.1 \text{ nm}$); 5 — одномодовый иттербиевый (Yb^{+3}) активный световод (АС); 6 — ОПД; 7 — МОМПС-сенсорный элемент ОПД; 8 — внутренняя полость ОПД; 9 — корпус ОПД; 10 — тонкопленочная структура ($\text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2$); 11 — фотоприемник; 12 — АРУ; 13 — колебательный контур (f_k, Q_k); 14 — амплитудный детектор; 15 — фильтр низких частот.

микробалки на опорах, возбуждаемое лазерным излучением, и микро- мембрана, воспринимающая переменную составляющую $p(t)$ полного давления в среде $P(t) = \bar{P} + p(t)$, $p(t) = p \cos(\Omega t)$, $p \ll \bar{P}$. Динамические деформации микромембраны посредством опор преобразовыва-

ются в продольные механические напряжения в микроосцилляторе, вызывающие модуляцию резонансной частоты $f(t)$. Эффективность подобных СЭ при измерении постоянных давлений продемонстрирована в ряде работ [6].

Чувствительность СЭ к переменному давлению $S = \frac{1}{f} \frac{df}{dp}$ зависит как от параметров МОМРС–СЭ, так и от физических свойств среды, условий и характера взаимодействия СЭ со средой. Последние существенно зависят от соотношений частот $\frac{\Omega}{v}$, $\frac{\Omega}{f}$, $\frac{\Omega}{v_c}$ (где v_c, v — собственная частота основной моды полости ОПД и поперечных колебаний микромембраны), а также от соотношений между характерными размерами МОМРС (L) и длиной звуковой волны в среде $\lambda_a = \frac{2\pi s}{\Omega}$, где s — скорость звука в среде. Режимы измерений в типичных „квазистационарных“ условиях ($L \ll \lambda_a$; $\Omega \ll v, f, v_c$) соответствуют модели, в которой микромембрана СЭ граничит с двумя однородными средами с разностью давлений $p(t)$ (внутри и снаружи ОПД), при этом отклик СЭ на переменную компоненту $p(t)$ описывается в „статическом“ приближении.

С целью обеспечения высокой чувствительности ВОДД именно к переменному давлению нами предложена конструкция СЭ (рис. 1), в которой микромембрана прямоугольной формы закреплена к корпусу МОМРС лишь вдоль одной пары противоположных сторон, при этом между свободными краями и корпусом СЭ выполнены зазоры определенной ширины ($\Delta < 1 \mu\text{m}$), с заданным акустическим сопротивлением в интересующем диапазоне частот (Ω). Указанные зазоры обеспечивают, с одной стороны, выравнивание статического давления снаружи и внутри ОПД (включая полость NLIFP), с другой — изоляцию внутренней области преобразователя от колебаний давления в среде, при этом в рассматриваемых СЭ для повышения эффективности преобразования деформаций микромембраны в продольные механические напряжения микроосциллятора существенно увеличена площадь подошвы опор.

В рамках указанного приближения расчеты характеристик мод собственных колебаний и чувствительности СЭ, находящихся в газообразной или жидкой среде, могут быть проведены единым образом [7,8]; при этом собственные частоты (v, f) мод поперечных колебаний микромембраны с размерами $L \times B \times H$ и микроосциллятора $l \times b \times h$, моделируемых микробалками соответственно с опертыми ($t \ll H$) и заделанными краями, составляют

$$v = v_0 \left(1 - \frac{1}{4Q_v^2}\right)^{1/2} \left(1 + k_v \frac{\rho_e B}{\rho H}\right)^{-1/2}, \quad (1)$$

$$f(t) = f_0 \left(1 - \frac{1}{4Q_f^2}\right)^{1/2} \left(1 + k_f \frac{\rho_e b}{\rho h}\right)^{-1/2} \left(1 + 0.3 \left(\frac{l}{h}\right)^2 \varepsilon(t)\right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $\nu_0 \approx 0.46 \frac{H}{L^2} \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$, $f_0 \approx 1.03 \frac{h}{L^2} \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$ — соответствующие резонансные частоты в вакууме; $Q_{v,f}$ — добротности микромембраны и микроосциллятора в среде (в воздухе $Q_{v,f} \cong 10-10^3$; в жидкостях $Q_{v,f} \cong 3-30$ [7]); ρ_e, ρ — соответственно плотности среды и материала ММРС; E — модуль Юнга; коэффициенты $k_{v,f} \approx 1$; $\varepsilon(t) = \frac{\Delta l}{l}$ — относительное удлинение микроосциллятора, обусловленное деформацией микромембраны:

$$\varepsilon(t) \approx \frac{3}{4(1+\kappa)} \frac{dL^2}{H^3} \frac{p(t)}{E}, \quad (3)$$

где параметр $\kappa = \frac{12bh d^2}{BH^3}$ учитывает уменьшение деформаций микромембраны из-за обратного влияния микроосциллятора. Формула (3) получена без учета компенсирующей силы „упругости“, действующей на микромембрану со стороны среды, заполняющей полость ОПД. В случае газообразных сред с большой объемной сжимаемостью $\beta_g = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \approx 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ (в нормальных условиях) указанный эффект не приводит к заметной погрешности, однако для жидкостей с типичными значениями $\beta_l = (2-10) \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ данное приближение справедливо лишь при достаточном объеме ОПД, превышающем $V_{cr} \approx \frac{5}{64} \frac{1}{E\beta_l} \frac{L^5 B}{H^3}$.

С учетом (2), (3), предполагая, что $\varepsilon \ll \left(\frac{h}{l}\right)^2$, чувствительность СЭ составляет

$$S \approx \frac{0.11}{1+\kappa} \left(\frac{l}{h}\right)^2 \frac{dL^2}{H^3 E}, \quad (4)$$

при этом порог чувствительности (ВОДЦ) можно оценить как $p_n \simeq S^{-1} \left(\frac{\Delta F}{F}\right)_{fl}$, где $\left(\frac{\Delta F}{F}\right)_{fl}$ — относительные флуктуации частоты автоколебаний.

В силу равенства гидростатических давлений внутри и снаружи преобразователя среднее значение базы NLIFP не зависит от абсолютного давления в среде ($H_0 = \text{const}$), что обеспечивает с учетом высокой стабильности линии генерации ВЛ, определяемой в основном спектральными свойствами лазерного резонатора с брэгговской решеткой ($\Delta \lambda_{\text{FBG}} \leq 0.1 \text{ nm}$), необходимую стабильность положения „рабочей точки“ NLIFP в зоне возбуждения автоколебаний и оптимальные режимы в жестких условиях эксплуатации ВЛ–ММРС.

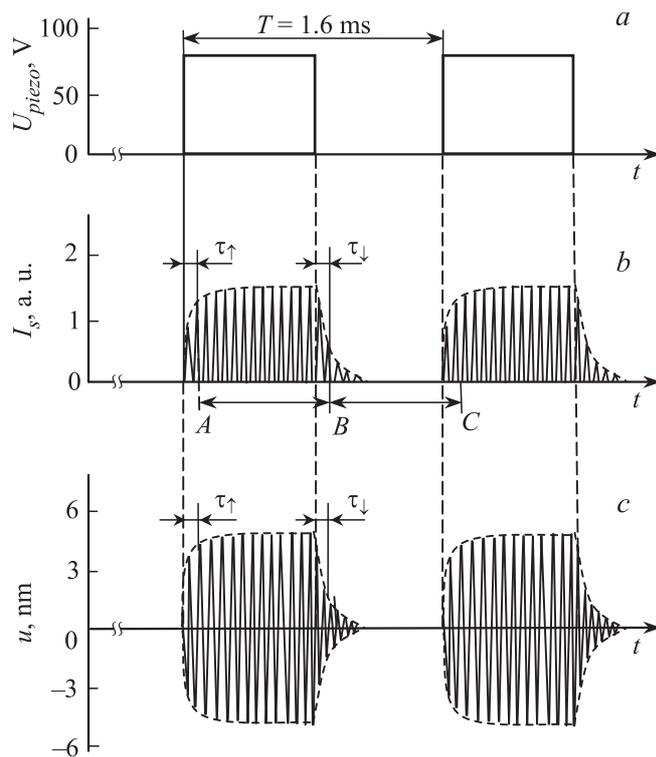


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов (установление, срыв) автоколебаний: управляющее электрическое напряжение на пьезопреобразователе (*a*); интенсивность ВЛ (*b*); колебания (смещения, u) микроосциллятора (*c*). В интервале *AB* существуют автоколебания $F = f$; *BC* — автоколебания отсутствуют.

На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования процессов установления и срыва автоколебаний в ВЛ–МОМРС (на воздухе), полученные в условиях быстрого изменения рабочей точки — ее возврата в зону возбуждения автоколебаний и удаления из нее путем резкого изменения базы NLIFP с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Наблюдаемые длительности переходных процессов (τ_{\uparrow} , τ_{\downarrow}) составляют $\tau_{\uparrow, \downarrow} \approx 0.1–0.12$ ms, которые качественно соответствуют оценкам $\tau_{\uparrow, \downarrow} \simeq k \frac{Q}{\pi f}$, где $k \simeq 1$.

Экспериментальное исследование модуляции характеристик автоколебаний в ВЛ–МОМРС в условиях воздействия на микроосциллятор звуковой волны (в воздухе) выполнено с помощью ОПД на основе кремниевых МОМРС–СЭ с параметрами: $l \times b \times h = 270 \times 8 \times 3 \mu\text{m}$; $f = 310 \text{ kHz}$, $Q_f = 170$ (на воздухе); $l \times b \times h = 1000 \times 1000 \times 10 \mu\text{m}$; $\nu_c = 2.6 \text{ kHz}$; $\nu = 40 \text{ kHz}$ (причем микромембрана квадратной формы закреплена по всему периметру). Установлено, что в диапазоне звуковых частот $\frac{\Omega}{2\pi} = 60\text{--}800 \text{ Hz}$ ($\frac{\Omega}{2\pi} \ll \frac{1}{\tau_f + \tau_1}, \frac{1}{3} \nu, \frac{1}{3} \nu_c$) четко наблюдается модуляция частоты автоколебаний, при этом в условиях регистрации звукового давления с фиксированной частотой $\frac{\Omega}{2\pi} = 300 \text{ Hz}$ пороговая чувствительность составляет $p_n = 0.3 \text{ Pa}$. Динамический диапазон рассматриваемых ВОДД ограничен нелинейностью отклика, обусловленной, в частности, нелинейным характером деформаций микромембраны при значительных амплитудах колебаний, нелинейной зависимостью собственной частоты микроосциллятора (формула (2)) и неизохронностью колебаний, которые приводят к оценке $p_{\text{max}}/p_n \simeq 3 \cdot 10^3$. По нашим оценкам, оптимизация СЭ и волоконного лазера позволяет получить показатели ВОДД, не уступающие характеристикам уникальных образцов „точечных“ ВОД акустического давления [9].

Таким образом, в работе показана возможность реализации автогенераторных ВОД переменного давления, основанных на модуляции резонансной частоты микроосциллятора звуковым давлением в газообразных или жидких средах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.579.21.0078 о предоставлении субсидии.

Список литературы

- [1] Егоров Ф.А., Потапов В.Т. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 9. С. 808–817.
- [2] Егоров Ф.А., Потапов В.Т., Мелькумов М.А., Шубин А.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 8. С. 30–36.
- [3] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
- [4] Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 408 с.

- [5] *Варадан В., Виной К., Джозе К.* ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
- [6] *Thornton K.E.B., Uttamchandani D., Culshaw B.* // Sens. Actuators. A. 1990. V. 24. P. 15–19.
- [7] *Lu X., Guo Q., Xu Z., Ren W., Cheng Z.-Y.* // Sens. Actuators. A. 2012. V. 179. P. 32–38.
- [8] *Hosseini-Hashemi S.H., Karimi M., Rokni H.* // Appl. Math. Modelling. 2012. V. 36. P. 764–778.
- [9] *Kilic O., Digonnet M.Y.F., Kino G.S., Solgaard O.* // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 129(4). P. 1837–1850.