

09

## Волоконно-оптические датчики, основанные на флуктуационных колебаниях световодных микрооптомеханических резонансных структур

© Ф.А. Егоров

Научно-производственная компания „Мониторинг-Центр“,  
111399 Москва, Россия  
e-mail: egorov-fedor@mail.ru

(Поступило в Редакцию 20 июля 2012 г. В окончательной редакции 6 марта 2013 г.)

Разработаны и исследованы характеристики волоконно-оптических виброчастотных датчиков деформаций и температуры, использующих термофлуктуационные резонансные колебания в оптоволоконных SMS(M)-структурах — чувствительных элементах, выполненных в виде колебательных систем с распределенными параметрами на основе последовательно соединенных секций одномодовых и многомодовых ступенчатых световодов. Регистрация флуктуационных колебаний основана на амплитудно-фазовой модуляции световой волны в многомодовой осциллирующей секции вследствие изменений разности хода и туннелирования интерферирующих лучей. Экспериментально продемонстрирована точность измерения температуры  $\pm 2^\circ\text{C}$  и относительных деформаций  $\pm 10^{-5}$ . Сделана оценка предельной точности измерения резонансной частоты, основанная на приближенном расчете дисперсии Аллана, которая показывает возможность создания датчиков рассматриваемого типа с порогом чувствительности к температуре  $0.001^\circ\text{C}$  и к деформациям  $10^{-8}$  соответственно.

Микрооптомеханические резонансные структуры (MOMRS, микроосцилляторы) эффективны в разных областях экспериментальной физики [1], в частности, при исследовании физико-химических свойств микро-, нано-объектов [2,3]. С уменьшением эффективной массы (размеров) MOMRS возрастает роль термофлуктуационных возмущений, в результате при обычных температурах ( $\theta \simeq 300\text{ K}$ ) предельную чувствительность и точность датчиков на основе микроосцилляторов ограничивают, как правило, термомеханические флуктуации [4]. Вместе с тем в схемах без специальных источников возбуждения колебаний именно флуктуационные возмущения приводят к раскачке акустомеханических резонансных колебаний микроосцилляторов, регистрация которых позволяет в принципе осуществлять измерения. При этом значительно упрощается устройство и алгоритм работы „пассивного датчика“, что повышает его надежность, срок службы, расширяет область применений. В настоящей работе исследованы виброчастотные волоконно-оптические датчики (ВЧВОД) деформаций и температуры, основанные на измерении амплитудно-частотных характеристик термомеханических флуктуационных колебаний оптоволоконных MOMRS, созданных на базе световодных структур в виде последовательно соединенных одномодовых (SMF) и многомодовых секций ступенчатых световодов (MMF), формирующих структуры  $\text{SMF}_1\text{--MMF--SMF}_2$  (SMS), в которых роль колебательного звена выполняет секция MMF с микронными размерами.

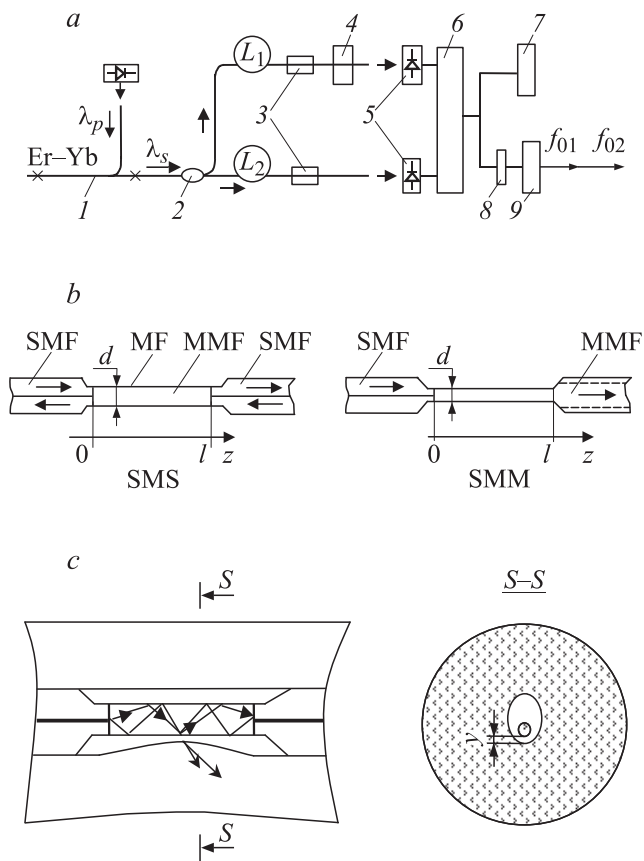
Схема ВЧВОД приведена на рис. 1. Источником „пробного“ излучения служит волоконный эрбиевый суперфлуоресцентный излучатель (ASE,  $\lambda_s \simeq 1540\text{ nm}$ ) с выходной мощностью  $P_0 = 0\text{--}300\text{ }\mu\text{W}$  и шириной спектра  $\Delta\lambda_s \leq \Delta\lambda_{\text{SMS}}$ , где  $\Delta\lambda_{\text{SMS}}$  — спектральная ши-

рина главного интерференционного максимума структур SMS ( $\Delta\lambda_{\text{SMS}} \simeq 20\text{ nm}$ ) [5]. Измерение малых амплитуд колебаний с помощью некогерентного света продемонстрировано в ряде работ [6]. Для повышения чувствительности измерительной системы использована дифференциальная схема [7] с равными длинами световодных плеч  $L_1 = L_2 \simeq 20\text{ m}$ , позволяющая обнаружить слабую модулированную составляющую сигналов в плечах  $\Delta\bar{p} \geq 10^{-7}\bar{p}$ , измеряемых с помощью идентичных фотоприемников на основе *pin*-фотодиодов InGaAs, обеспечивающих в полосе частот  $1\text{--}100\text{ kHz}$  пороговую чувствительность  $P_{\text{min}} \simeq 2 \cdot 10^{-13}\text{ W}/\sqrt{Hz}$  ( $\bar{p}$  — средняя мощность излучения,  $\bar{p} = 20\text{--}50\text{ }\mu\text{W}$ ). Частотное разрешение спектрального анализатора в диапазоне  $1\text{--}20\text{ kHz}$  составляет  $\Delta f \leq 40\text{ Hz}$ , узкополосный перестраиваемый фильтр имеет ширину полосы  $B \leq 20\text{ Hz}$ . Разработана лабораторная технология изготовления MOMRS, включающая следующие этапы:

- 1) формирование структур SMS с помощью сварных соединений встык кварцевого одномодового специального световода (SMF —  $4/125\text{ }\mu\text{m}$ ,  $NA \approx 0.24$ ) с многомодовым ступенчатым световодом (MMF —  $100/125\text{ }\mu\text{m}$ ),

- 2) химическое травление структур SMS полирующим составом на основе плавиковой кислоты для получения заданных размеров, формы. В результате размеры секций MMF в виде однородных стержней из кварцевого стекла составляют  $d \simeq 20\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$ ,  $l \simeq 2\text{--}6\text{ mm}$ , которые ограничены снизу лишь возможностями использованной технологии. Для защиты остальной части структур SMS от контакта с травителем использовалась канифоль, легко удаляемая этиловым спиртом;

- 3) высокотемпературная обработка структур SMS в дуге электрического разряда для сглаживания шерохо-



**Рис. 1.** *a* — схема виброчастотного волоконно-оптического датчика на основе MOMRS: 1 — ASE (Er), 2 — волоконный разветвитель 50 × 50, 3 — MOMRS на основе SMS(M), 4 — оптический аттенуатор, 5 — фотоприемники, 6 — формирователь разностного сигнала, 7 — анализатор спектра (C4-73), 8 — перестраиваемый узкополосный фильтр (Uniran-233), 9 — частотомер (ЧЗ-54). *b* — схемы структур SMS и SMM структур, *c* — схема MOMRS.

ватостей поверхности секции MMF, возникающих при травлении,

4) нанесение тонкой металлической пленки (MF) из никеля или хрома на часть поверхности секции MMF для создания исходной разности фаз ( $\Delta\varphi_0$ ) интерферирующих лучей в структуре SMS, необходимой для обеспечения высокой чувствительности схемы к поперечным колебаниям сегмента MMF (условия квадратуры интерферометров:  $\Delta\varphi_0 = 2\pi m \pm \pi/2$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Сформированные структуры закреплены внутри микрокапилляра из легкоплавкого стекла с внутренним и наружным диаметрами соответственно: 127–130/650–680  $\mu\text{m}$  (рис. 1, *c*). В экспериментах использованы MOMRS двух видов: 1) с консольным закреплением секций MMF, 2) струнные — с заделанными концами секций MMF — кварцевых стержней.

Регистрация флуктуационных колебаний MMF-секции MOMRS основана на амплитудно-фазовой модуляции

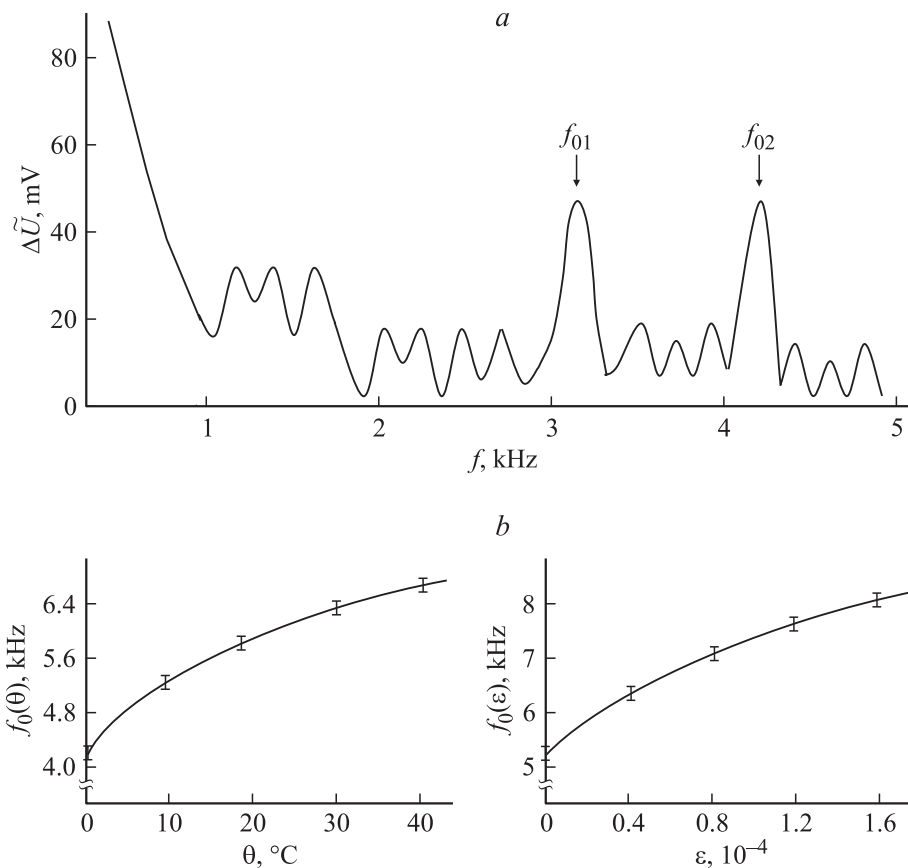
световой волны, распространяющейся в осциллирующей структуре SMS, обусловленной:

1) модуляцией разности хода и соответствующих фаз  $\Delta\varphi(t)$  интерферирующих лучей в секции MMF при ее колебаниях,

2) туннелированием света из секции MMF в микрокапилляр при нарушенном полном внутреннем отражении в секции MMF. Туннелирование происходит в специальной зоне сужения отверстия микрокапилляра с асимметричным профилем сечения (рис. 1), сформированном путем локального нагрева микрокапилляра вблизи определенных участков секции MMF, где большая часть распространяющихся лучей одновременно испытывает отражение. Нагрев микрокапилляра осуществляется в электрическом разряде минидуги. В силу того что температура размягчения кварцевого стекла (1500–1600 °C) значительно выше, чем у микрокапилляра (550–600 °C), процесс формирования зоны сужения не приводит к заметным деформациям структур SMS. В условиях малого зазора между внутренней поверхностью микрокапилляра и секцией MMF ( $y \leq \lambda$ , рис. 2) происходит туннелирование части лучей из секции MMF в микрокапилляр. Формирование зоны сужения осуществляется в условиях непрерывного контроля коэффициента прохождения структур ( $T$ ), характеризующего также оптическую связь секции MMF с микрокапилляром. Регулировка мощности и положения минидуги относительно микрокапилляра позволяет варьировать форму участка сужения и длительность его формирования, составляющую 8–15 мин. При достижении заданного коэффициента прохождения одновременно гасится минидуга, что обеспечивает точность установки зазора  $\Delta y \approx \pm 50 \text{ nm}$ .

В соответствии с картиной распределения интенсивности света в структуре SMS [5] зоны максимальной оптической связи секции MMF с микрокапилляром расположены на расстояниях  $z_k = (k - 1/2)z_0$  от места стыка световодов SMF и MMF, где  $z_0 = 4nd^2/\lambda$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$  — показатель преломления сегмента MMF,  $n(\lambda_s) = 1.45$ . Высокая локальность нагрева (0.2–0.3 mm) позволяет сформировать вдоль секции MMF несколько периодических зон туннелирования, что повышает глубину модуляции сигнала, особенно для фундаментальной моды поперечных колебаний секции MMF.

Наряду с повышением чувствительности схемы к колебаниям секции MMF использование оптического туннелирования позволяет применять более простые MOMRS на основе световодных структур SMF–MMF–MMF (SMM), в которых для приема и передачи излучения из секции MMF на вход фотоприемника используется многомодовый световод (рис. 1, *c*), что упрощает схему ВЧВОД и снижает требования к точности элементов конструкции MOMRS. В частности, целесообразно выполнение секции MMF в виде оголенного и утонченного участка световодеющей сердцевины, монолитного (цельного) с многомодовым транзитным световодом (рис. 1, *c*), что автоматически обеспечивает, во-первых, выполнение краевых условий для секции MMF — жесткую заделку, во-вторых, эффективное



**Рис. 2.** *a* — фурье-спектр разностного сигнала, *b* — функции преобразования ВЧВОД: зависимость  $f_0(\theta)$  (температура-частота) (*a*), зависимость  $f_0(\varepsilon)$  (относительные деформации-частота) (*b*).

оптическое согласование секции MMF с приемным световодом.

Уменьшение коэффициента прохождения структур SMS(M), обусловленное туннелированием света, зависит от показателей преломления, размеров секций MMF и зон сужения микрокапилляров, при этом  $\Delta T/T(\infty) \approx 0.1-0.2$ , где  $\Delta T = T(\infty) - T(0)$ ,  $T(y)$  — коэффициент прохождения при величине зазора  $y$ . Отметим, что явление туннелирования света и механизмы появления потерь в волоконных световодах несколько сложнее, чем в планарных структурах [8]. Значения  $\Delta T$  измерены с помощью осциллограмм разностных сигналов для структур SMM, в которых модуляция фазы волны в секции MMF практически не проявляется. Осциллограммы регистрировались в условиях интенсивных вибраций MOMRS на резонансных частотах, приводящих к механическому и, как следствие, к оптическому контакту секции MMF с поверхностью микрокапилляра в зоне сужения, что проявляется в виде искажений формы сигналов. Основное изменение  $T(y)$  происходит в интервале значений  $y = 0 - \lambda/2$ , при этом модулированную составляющую мощности проходящего излучения, обусловленную колебаниями секции MMF, можно оценить как  $\Delta \bar{p} \approx 2P_0 \Delta T \Delta \bar{y} / \lambda$ , где  $\Delta \bar{y} = y(t) - \bar{y}$  — флуктуационные смещения секции MMF относительно положения равновесия с величиной зазора  $\bar{y}$ . Иссле-

дованные MOMRS на основе структур SMS характеризовались  $T(\infty) \approx 0.1-0.4$ , при этом вклад эффекта туннелирования в модулированную часть сигнала мог достигать 60%; для структур SMM  $T(\infty) \geq 0.95$ .

В экспериментах использованы MOMRS с собственными частотами и добротностью основной моды поперечных колебаний соответственно  $f_0 = 2-15 \text{ kHz}$ ,  $Q = 400-1500$  (в вакууме при давлении 3–10 mbar). Спектры фурье разностных сигналов  $\Delta\tilde{U}(t)$  в схеме ВЧВОД со струнным и консольным MOMRS с параметрами:  $f_{01} \approx 3.3 \text{ kHz}$ ,  $Q_1 \approx 930$ ,  $d_1 \approx 20 \mu\text{m}$ ,  $l_1 \approx 5.4 \text{ mm}$ ;  $f_{02} \approx 4.2 \text{ kHz}$ ,  $Q_2 \approx 540$ ,  $d_2 \approx 20 \mu\text{m}$ ,  $l_2 \approx 3 \text{ mm}$  приведены на рис. 2, которые четко показывают, что вблизи собственных частот MOMRS амплитуда колебаний мощности излучения в плечах схемы имеет максимальное значение. При этом отношение фурье-амплитуд сигналов на собственной частоте MOMRS к амплитуде фонового сигнала (вне полосы резонанса) достигает  $S/N \approx 4$  (в частотной полосе  $B \approx 20 \text{ Hz}$ ), что позволяет отчетливо зарегистрировать флуктуационные резонансные колебания секций MMF и определить приближенное значение собственной частоты микроосциллятора.

На основе MOMRS струнного типа созданы ВЧВОД температуры ( $\theta$ ) и деформаций ( $\varepsilon = \Delta l/l$ ), в которых используется зависимость резонансной частоты от температуры и продольных механических напряжений в

секции ММФ (рис. 2). Напряжения обусловлены как термическими деформациями из-за разницы коэффициентов теплового расширения материалов, используемых в конструкциях первичных преобразователей датчиков, так и внешними силами, приложенными к преобразователям, выполненным в виде стержней из латуни или инвара с продольно закрепленными в них структурами MOMRS. Инваровый сплав с низким коэффициентом теплового расширения использован для минимизации термодформаций в MOMRS. С учетом изгибной жесткости секции ММФ приближенная зависимость резонансной частоты  $f_0(\varepsilon)$  от продольной относительной деформации секции ММФ выражается формулой [9]

$$f_0(\varepsilon) \approx f_0 \sqrt{1 + 0.3 \left(\frac{l}{d}\right)^2 \varepsilon}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что порог чувствительности  $\varepsilon_{\min}$  определяется в основном точностью измерения относительных изменений резонансной частоты  $(\Delta f_0/f_0)_{\min}$ . Хотя точностные характеристики исследованных ВЧВОД весьма умеренные ( $\Delta\theta \approx \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $\Delta\varepsilon \approx \pm 10^{-5}$ ), что обусловлено сравнительно низкой точностью измерения резонансной частоты в условиях зашумленных сигналов  $(\Delta f_0/f_0)_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-2}$  (высота „точек“ на кривых рис. 2 характеризует точность измерения частоты), однако оценки, приведенные ниже, свидетельствуют о значительном потенциале и перспективности разработки ВЧВОД, использующих флуктуационные колебания в MOMRS.

В соответствии с флуктуационно-диссипационной теоремой спектральная плотность случайных смещений центра масс секции ММФ MOMRS, обусловленных действием термомеханических флуктуационных сил в приближении однорезонансного линейного осциллятора, определяется выражением [10]

$$\langle \Delta \tilde{y}^2 \rangle = \frac{4k\theta}{m_{\text{eff}}Q} \frac{\omega_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\omega_0^2/Q^2}, \quad (2)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $m_{\text{eff}}$  — эффективная масса колебательного звена,  $k$  — постоянная Больцмана. При этом предельная относительная точность измерения резонансной частоты  $(\Delta f_0/f_0)_{\min}$ , определяемая дисперсией Аллана ( $\delta_A$ ), выражается формулой

$$\delta_A = \left(\frac{\Delta f_0}{f_0}\right)_{\min} \simeq \sqrt{\frac{B}{Q\omega_0^2\tau}}, \quad (3)$$

где  $B$  — ширина полосы узкополосного фильтра,  $\tau$  — длительность измерения частоты. Формула (3) предполагает доминирующий вклад в модуляцию выходного сигнала ВЧВОД именно флуктуационных колебаний MOMRS, которые помимо указанных термофлуктуационных сил могут обуславливаться также и другими причинами. В частности, в структурах SMS(M) с асимметричным сечением (покрытием) заметный вклад в случайные колебания секций ММФ могут дать равновесные

флуктуации температуры  $(\Delta\theta)^2 = k\theta^2/C$ , которые вследствие разницы коэффициентов теплового расширения материалов приводят к возникновению неоднородных механических напряжений и изгибных моментов в сечениях секций ММФ (аналог биметалла,  $C$  — теплоемкость секции ММФ). Кроме того, в рассматриваемых MOMRS с туннельной связью секций ММФ с микрокапилляром значительные флуктуации входной мощности излучения могут вызвать дополнительные случайные колебания секций ММФ под действием пондеромоторных „оптических“ сил, пропорциональных поперечному градиенту интенсивности света [11], весьма значительному в зонах туннелирования.

Чувствительность использованной схемы к смещениям секции ММФ, приведенная к единичной полосе частот, ограничена, главным образом, шумами выходной мощности использованного источника ASE и в рабочем диапазоне частот (2–15 kHz) достигает  $\Delta \tilde{y}_{\min} \approx 10^{-12} \text{ м}/\sqrt{\text{Гц}}$ , при этом расчетная спектральная плотность смещений на резонансной частоте в соответствии с формулой (2) составляет

$$\Delta \tilde{y}(\omega_0) \simeq \sqrt{\frac{4k\theta Q}{m_{\text{eff}}\omega_0^3}} \approx 15 \cdot 10^{-12} \text{ м}/\sqrt{\text{Гц}},$$

что заметно превышает порог чувствительности использованной схемы и качественно соответствует данным на рис. 2. В соответствии с формулой (3) при заданном быстродействии ВЧВОД, ограничивающем максимальные значения параметров  $(\tau, B^{-1})$ , точность измерений частоты можно повысить за счет увеличения добротности и/или резонансной частоты микроосциллятора. При использовании специальных источников света с низкой плотностью шумов и высокочувствительных фотоприемников [12], в схеме ВЧВОД по нашим оценкам возможно повышение пороговой чувствительности к смещениям секции ММФ до уровня  $\Delta \tilde{y}_{\min} \approx 10^{-14} \text{ м}/\sqrt{\text{Гц}}$ , что позволяет использовать MOMRS с более высокими резонансными частотами ( $f_0 \gg 10 \text{ kHz}$ ) без ухудшения соотношения сигнал-шум в разностном сигнале. Наряду с этим, как показано в работе [13], современные технологии изготовления осцилляторов из плавленого кварца позволяют достигать значений добротности  $Q = 10^5 - 10^6$  при обычных температурах. Оптимальные резонансные частоты микроосцилляторов определяются с учетом эффекта уменьшения добротности с ростом частоты из-за механизма термоупругой диссипации энергии колебаний [14]. Важно также учитывать дополнительную погрешность измерений ВЧВОД, связанную с влиянием частотнозависимых случайных инерционных сил на колебательное звено виброчастотного датчика [9], которые обусловлены возмущениями естественного или техногенного характера, испытываемых контролируемым объектом вместе с датчиком. Спектральная плотность мощности указанных возмущений существенно неравномерна и сосредоточена, как правило, в области низких частот [15]. С учетом отмеченных факторов представляется, что в оптимизированных схемах

ВЧВОД следует использовать MOMRS с резонансными частотами в диапазоне  $10^{-2}$ –1 МГц, при этом порог чувствительности рассматриваемых ВЧВОД может достигать  $\Delta\theta_{\min} \approx 0.001^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon_{\min} \approx 10^{-8}$  соответственно, что позволит значительно расширить области их применений. Примечательно, что в рассматриваемых ВЧВОД благодаря минимальной амплитуде колебаний достигается предельная (минимальная) величина одной из основных составляющих погрешности виброчастотных датчиков [9], связанной с неизохронностью собственных (резонансных) колебаний осциллятора.

## Список литературы

- [1] Цуканов А.В. // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 5. С. 359–369.
- [2] Pini V., Tiribilli B., Gambi C.M.C. et al. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. P. 054 302.
- [3] Lavrik N.V., Sepaniak M.Y., Datskos P.G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. N 7. P. 2229–2253.
- [4] Mohd-Yasin F., Nagel D.Y., Korman C.E. // Meas. Sci. Technol. 2010. Vol. 21. P. 012 001.
- [5] Silva S., Pachon E.G.P., Franco M.A.R. et al. // Appl. Opt. 2012. Vol. 51. N 16. P. 3236–3242.
- [6] Basarir O., Bramhavar S., Basilio-Sanchez G. et al. // Opt. Lett. 2010. Vol. 35. N 11. P. 1792–1794.
- [7] Алексеев Э.И., Базаров Е.Н., Баранников Ю.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 23. С. 1–6.
- [8] Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
- [9] Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 408 с.
- [10] Ramos D., Tamayo Y., Mertens Y. et al. // Nanotechnology. 2008. Vol. 19. P. 035 503.
- [11] Ma J., Povinelli M.L. // Opt. Express. 2011. Vol. 19. N 11. P. 10 102–10 110.
- [12] Li Mo, Pernice W.H.P., Tang H.X. // Nature Nanotechnology. 2009. Vol. 4. P. 377–382.
- [13] Лясковская Н.Ю. Тепловые и избыточные механические шумы в прототипах кварцевых подвесов зеркал гравитационных антенн. Автореф. канд. дис. М. 2006.
- [14] Sudipto K.De, Aluru N.R. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74. P. 144 305.
- [15] Lalanne C. Mechanical Vibration, Random Vibration, John Wiley and Sons. 2010. Vol. 3. 448 p.