

07:08

## Оптоволоконные виброчастотные измерительные преобразователи на основе нерегулярных световодов

© Ф.А. Егоров, В.Т. Потапов

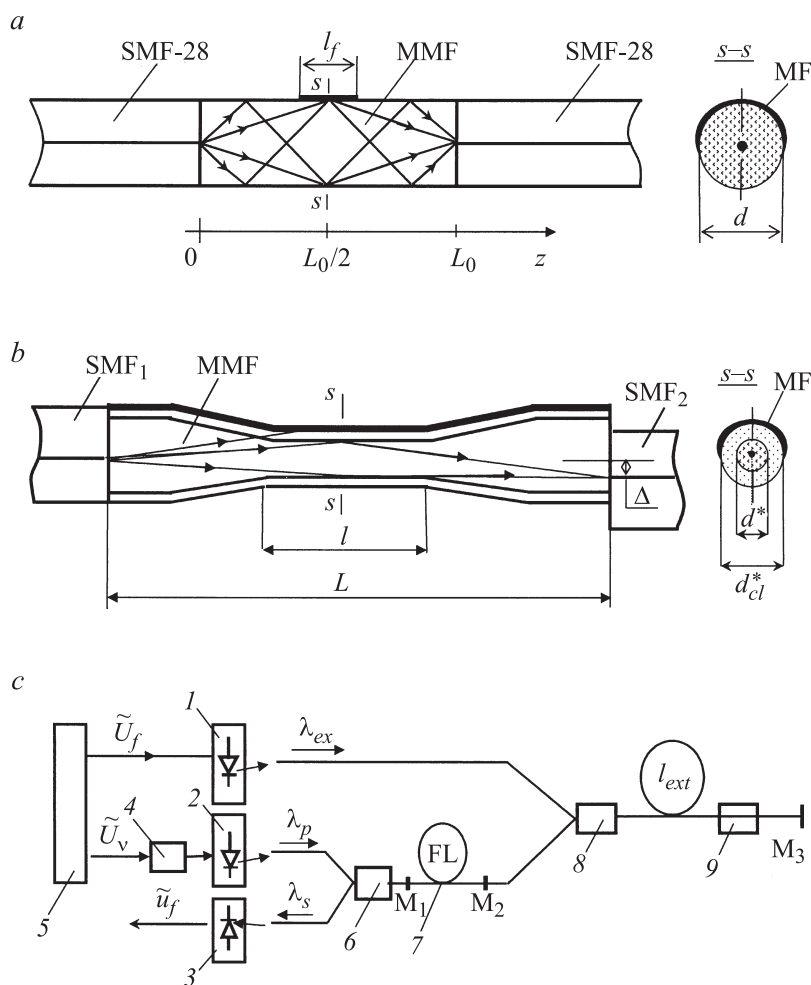
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Московская обл., Фрязино  
E-mail: egorov-fedor@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2012 г.

Исследованы световодные структуры SMF–MMF–SMF с нерегулярными сегментами MMF в режиме фотоиндуцированных резонансных колебаний. Показана возможность создания на их основе многопараметрических виброчастотных волоконно-оптических датчиков.

Оптоволоконные структуры (SMS) на основе одномодовых (SMF) и многомодовых световодов (MMF) открывают возможности для создания нового класса волоконно-оптических устройств [1–3], для расширения функциональных возможностей которых целесообразны исследования по разработке, в частности, оптически управляемых структур SMS. В данной работе на основе структур SMS с нерегулярными MMF реализована модуляция амплитуды и фазы распространяющегося в SMS излучения, обусловленная фотодеформационными акустомеханическими колебаниями сегмента MMF.

В экспериментах использованы два типа структур (рис. 1): SMS<sub>1</sub> — с многомодовым сегментом на основе однородного кварцевого стержня и SMS<sub>2</sub> — на основе кварцевого ступенчатого многомодового световода с биконическими переходами (перетяжками). Диаметр стержня  $d = 125 \mu\text{m}$ , показатель преломления  $n \simeq 1.45$ ; параметры исходного ступенчатого световода:  $d/d_{cl} = 100–110/125–140 \mu\text{m}$ ;  $NA \simeq 0.18–0.20$  ( $d_{cl}$  — диаметр оболочки световода). В качестве одномодовых световодов использованы стандартные SMF-28 и специальные световоды с повышенной числовой апертурой  $NA \simeq 0.16$ , подключенные к MMF с помощью сварки или механических разъёмных соединителей — юстировочных устройств. Фототермическое возбужде-



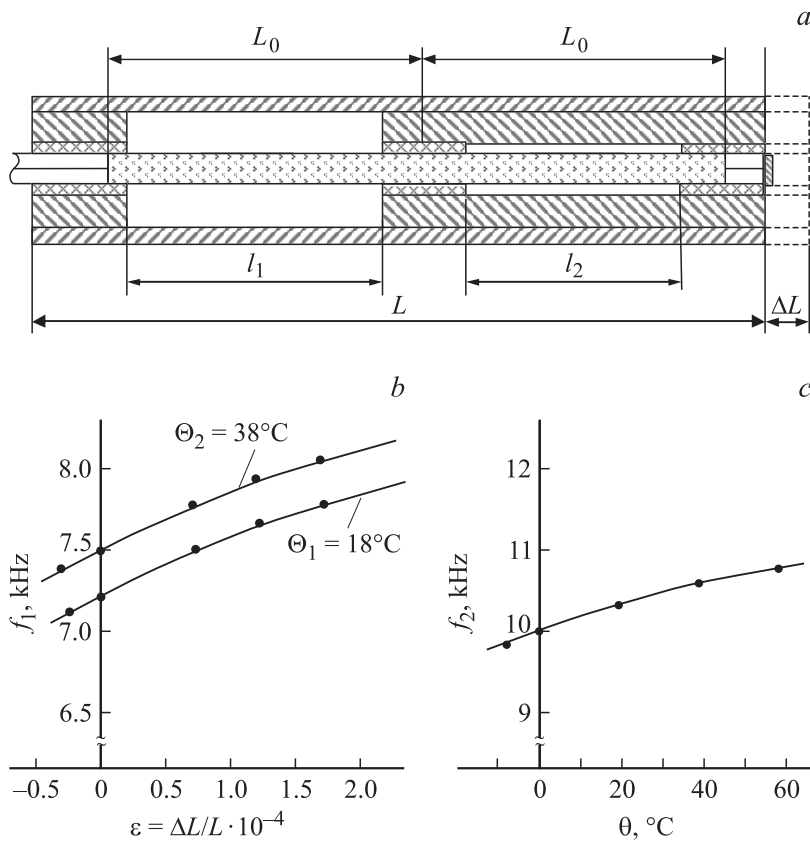
**Рис. 1.** Схемы световодных структур ( $a$  — SMS<sub>1</sub>,  $b$  — SMS<sub>2</sub>) и измерительной установки ( $c$ ): 1 — источник возбуждающего модулированного излучения ( $\lambda_{ex} = 1480$  nm); 2 — лазерный диод накачки ( $\lambda_p = 980$  nm); 3 — фотоприемник; 4 — фазовращатель; 5 — генератор синусоидальных сигналов; 6 — волоконно-оптический мультиплексор (WDM) (980/1550); 7 — волоконный лазер (Er–Yb); 8 — WDM (1480/1550); 9 — структура SMS;  $M_{1,2,3}$  — селективные полупрозрачные отражатели.

ние колебаний сегмента MMF осуществляется за счет энергии модулированного излучения, распространяющегося в MMF, часть которой поглощается металлической пленкой (MF), нанесенной асимметрично на участок поверхности сегмента [4]. Вследствие термоупругости в сегменте возникают периодические механические напряжения и изгибные моменты, приводящие главным образом к поперечным колебаниям. В SMS<sub>1</sub> пленка нанесена в середине сегмента на небольшом участке, в SMS<sub>2</sub> — на половину поверхности перетяжки по всей длине, при этом поглощается часть излучения, высвечивающаяся из сердцевины в оболочку. В SMS<sub>1</sub> наличие пленки приводит, кроме того, к дополнительному сдвигу фазы  $\Delta\varphi_0$  для лучей, отраженных от границы раздела стержень–пленка.

Спектры пропускания  $T(\lambda)$  исследованных структур SMS<sub>1,2</sub> (в диапазоне 1400–1600 nm) показывают, что максимальные значения  $T_{\max} = 15\text{--}45\%$ , причем положение пика ( $\lambda_{\max}$ ) и значения  $T_{\max}$  весьма чувствительны к параметрам сегментов MMF: в структурах SMS<sub>1</sub> при фиксированных размерах сегментов ( $T_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$ ) зависят от толщины и оптических констант MF; в SMS<sub>2</sub> определяющими являются характеристики исходного многомодового световода и размеры перетяжки ( $L$ ,  $l$ ,  $d^*$ ). Для главных максимумов пропускания SMS ширина спектра по уровню половинной интенсивности составляет  $\Delta\lambda_{1/2} = 8\text{--}20$  nm. Отметим, что в структурах SMS на основе регулярных сегментов MMF максимальное пропускание имеет место при длине сегмента  $L_k = L_0 k$ , где  $L_0 = 4nd^2/\lambda$ ,  $d$ ,  $n$  — соответственно диаметр и показатель преломления сердцевины MMF,  $\lambda$  — длина волны света,  $k = 1, 2, \dots$  [1]. При этом в сечениях MMF с координатами  $z_k = L_0(k - 1/2)$  излучение полностью сосредоточено в узком поясе на поверхности сегмента, что обеспечивает эффективное взаимодействие излучения в структурах SMS<sub>1</sub> с пленкой малых размеров. С учетом многолучевой интерференции интенсивность излучения в приемном световоде определяется суперпозицией результирующих амплитуд попарно симметричных лучей, которые распространяются в сегменте MMF вдоль определенных зигзагообразных линий (траекторий), формируя симметричные плечи интерферометра, сходящиеся в световедущей сердцевине SMF<sub>1,2</sub>. Максимумы пропускания структур SMS соответствуют определенным длинам сегмента  $L_k$ , обеспечивающим формирование наибольшего количества синфазных (с точностью до  $2\pi$ ) лучей указанного типа. В осесимметричных структурах SMS из-за отсутствия условия квад-

ратуры (вследствие синфазности плеч) указанные интерферометры характеризуются низкой чувствительностью к малым возмущениям, в частности к изгибным колебаниям сегмента ММФ. В рассматриваемых структурах SMS<sub>1</sub> необходимая чувствительность к колебаниям достигается благодаря разбалансу фаз в плечах, возникающему из-за дополнительного сдвига фаз  $\Delta\varphi_0$  для лучей, отраженных от MF, и формирующих одно из плеч интерферометра. Для исключения взаимодействия с MF лучей противоположного плеча интерферометра длина пленки ограничена условием  $l_f \simeq 2nd/NA$ , где  $NA$  — числовая апертура SMF<sub>1,2</sub>. За счет применения специальных пленочных структур, в принципе, можно обеспечить максимальную чувствительность интерферометров ( $|\Delta\varphi_0| = \pi_2$ ) [5]. Таким образом, в структурах SMS<sub>1</sub> металлическая пленка выполняет две важные функции: 1) обеспечивает механизм возбуждения колебаний сегмента ММФ; 2) задает положение рабочей точки интерферометров, обеспечивая возможность регистрации малых колебаний. В структурах SMS<sub>2</sub> необходимая чувствительность к изгибным колебаниям сегмента ММФ достигается оптимизацией рабочей точки интерферометров за счет поперечного смещения одного из световодов SMF<sub>1,2</sub> относительно сегмента ММФ, т.е. несоосности структуры SMS<sub>2</sub>. Оптимальное поперечное смещение определяется экспериментально и составляет  $\Delta \simeq 1-3 \mu\text{m}$ . В исследованных структурах использованы пленки никеля (Ni) и хрома (Cr) с толщинами 50–200 nm, полученные методом электронно-лучевого испарения, которые характеризуются хорошей адгезией к кварцевому стеклу.

Схема установки для исследования фотоиндуцированных колебаний структур SMS<sub>1,2</sub> представлена на рис. 2. Оптическое возбуждение вынужденных колебаний сегмента ММФ осуществляется модулированным излучением с длиной волны  $\lambda_{ex} \simeq 1480 \text{ nm}$ , для регистрации колебаний используется эрбиевый волоконный лазер (FL) с диодной накачкой ( $\lambda_p \simeq 980 \text{ nm}$ ), обеспечивающей плавную регулировку и гармоническую модуляцию мощности излучения накачки  $P(t)$  путем изменения тока питания диода. Селективный полупрозрачный отражатель  $M_3$  на выходном торце SMF<sub>2</sub> обеспечивает почти полное отражение (93%) на линии генерации FL ( $\lambda_s \simeq 1538 \text{ nm}$ ) и пропускание (87%) на линии 1480 nm. Благодаря оптической связи FL с внешним резонатором ( $M_2M_3$ ), включающим структуру SMS, модуляция потерь  $\Delta\tilde{T}$  и фазы световой волны  $\Delta\tilde{\varphi}$  в структуре SMS, обусловленная колебаниями



**Рис. 2.** Схема виброчастотного преобразователя деформаций и температуры на основе структур SMS (a); градуировочные кривые: b —  $f_1(\varepsilon, \theta)$ , c —  $f_2(\theta)$ .

сегмента MMF, приводит к модуляции выходной мощности FL [6]:

$$\frac{\Delta \tilde{W}}{W} = \frac{\sqrt{\gamma_{rel}^2 + f^2}}{\sqrt{(f_{rel}^2 - f^2)^2 + \gamma_{rel}^2 f^2}} F(\Delta \tilde{T}, \Delta \tilde{\varphi}), \quad (1)$$

где  $f_{rel}(P)$  — частота релаксационных колебаний FL, зависящая, в частности, от уровня накачки  $P$ ;  $f$  — частота колебаний сегмента

ММФ;  $\gamma_{rel}$  — параметр затухания релаксационных колебаний FL,  $F(\Delta\bar{T}, \Delta\bar{\phi}) = G(A)$  функция модуляции потерь и фазы во внешнем резонаторе ( $M_2M_3$ ), зависящая, в свою очередь, от амплитуды ( $A$ ) колебаний сегмента ММФ. В формуле (1) предполагается, что длина внешнего резонатора  $l_{ext} \ll c/2f$ . В экспериментах резонансные частоты основных мод колебаний сегментов ММФ с жестким заземлением на концах составляли  $f = 4-15$  kHz; добротность механических колебаний (на воздухе) 100–400; при этом длина осциллирующего участка ММФ составляет определенную часть многомодового сегмента ( $l/L_0 = 1/6 - 1/3$ ). Значения  $f_{rel} \leq 10$  kHz достигались за счет увеличения длины резонатора лазера ( $M_1, M_2$ ) путем присоединения к отрезку активного световода пассивного участка (SMF-28). Длина внешнего резонатора  $l_{ext} = 10-200$  м. В соответствии с (1) чувствительность FL к колебаниям сегмента ММФ имеет резонансный характер, с максимумом при  $f_{rel} \simeq f$ , который достигается путем плавной регулировки уровня накачки FL. Дополнительное увеличение чувствительности может достигаться за счет использования нелинейных свойств лазеров с модулированной накачкой [7]. В частности, нами исследована возможность увеличения чувствительности FL за счет параметрического усиления в условиях главного параметрического резонанса, имеющего место при  $\nu \simeq 2f_{rel} \simeq 2f$ , где  $\nu$  — частота модуляции мощности накачки FL. Оптимизацией глубины модуляции накачки ( $\Delta P/P$ )  $\simeq 3 \cdot 10^{-2}$  и разности фаз  $\Delta\phi_{f,2f}$  между управляющими гармоническими сигналами  $\dot{U}_f$  и  $\dot{U}_\nu$  ( $\nu = 2f$ ) в данной схеме достигнуто увеличение чувствительности на 10–13%. Оценки показывают [8], что оптимизация параметров лазера позволит повысить чувствительность АД за счет параметрического усиления сигналов, по крайней мере, в 2–3 раза. Важно подчеркнуть, что высокая чувствительность FL позволяет регистрировать колебания сегмента ММФ с малой амплитудой ( $A \ll d$ ), когда заметно уменьшаются неизохронность колебаний (зависимость периода свободных колебаний от амплитуды) и связанная с ней погрешность измерения, характерная для виброчастотных датчиков [9].

Исследованные световодные структуры открывают возможности для создания многопараметрических виброчастотных волоконно-оптических датчиков, использующих метод частотного разделения измерительных каналов. На рис. 2 показана схема измерительного преобразователя на основе структуры SMS<sub>1</sub> виброчастотных волоконно-оптических датчиков, разработанного для одновременного контроля деформаций  $\epsilon$  и

температуры  $\theta$ . Чувствительным элементом преобразователя является сегмент ММФ, одна секция которого  $l_1$  расположена в тонкостенной части корпуса преобразователя испытывающего продольные деформации; при этом резонансная частота указанной секции  $f_1(\varepsilon, \theta)$  зависит как от деформаций, так и от температуры (рис. 2, *b*). Другая секция ( $l_2$ ) находится в массивной толстостенной части корпуса, нечувствительной к деформациям, и имеет резонансную частоту  $f_2(\theta)$  (рис. 2, *c*). В результате, измеренные значения  $(f_1, f_2)$  позволяют определить по отдельности величины деформаций  $\varepsilon(f_1, f_2)$  и температуры  $\theta(f_2)$ . По сравнению с волоконно-оптическими датчиками, на основе брэгговских решеток или интерферометров Фабри–Перо, при дистанционных измерениях в тяжелых условиях виброчастотные волоконно-оптические датчики характеризуются большей устойчивостью к дестабилизирующим факторам, поскольку в силу кодирования измеряемого параметра в резонансную частоту, флуктуации в спектре пропускания транзитного световода из-за наложения „случайных“ интерферометров, образованных дефектами и неоднородностями в линии, возникающими в процессе эксплуатации, не приводят к ухудшению точности измерений. Благодаря высокой стабильности физико-химических свойств и превосходным упруго-прочностным характеристикам световодов из однородного и чистого кварцевого стекла, использованных в предложенных структурах SMS, рассматриваемые виброчастотные волоконно-оптические датчики могут обеспечить большой срок службы (более 20 лет) и высокую надежность в жестких условиях эксплуатации.

## Список литературы

- [1] Frasao O., Silva S.O., Viegas J. et al. // Appl. Opt. 2011. V. 50. N 25. P. E184–E188.
- [2] Wu Q., Semenova Y., Wang P., Farrell G. // Proc of SPIE. 2011. V. 7753. P. 77535G.
- [3] Sun A., Semenova Y., Hatta A., Farrell G. // Microwave and Optical Technology Letters. 2011. V. 53. N 2. P. 442–445.
- [4] Michtchenko A., Tulaikova T. // AIP Conf. Proc. 2010. V. 1253. N 1. P. 254–264.
- [5] Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер с англ. М.: Наука. 1973. 721 с.

- [6] *Lacot E., Jacquin O., Rousely G. et al. // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. V. 27. N 11. P. 2450–2458.*
- [7] *Arellano-Sotelo H., Kiryanov A.V., Barmenkov Yu.O., Aboites V. // Optics and Laser Technology. 2011. V. 43. P. 132–137.*
- [8] *Witowski A., Lacot E., Hugon O. // Phys. Rev. A. 2005. V. 72. P. 023801.*
- [9] *Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 408 с.*