

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): SMS₁ — с многомодовым сегментом на основе однородного кварцевого стержня и SMS₂ — 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-

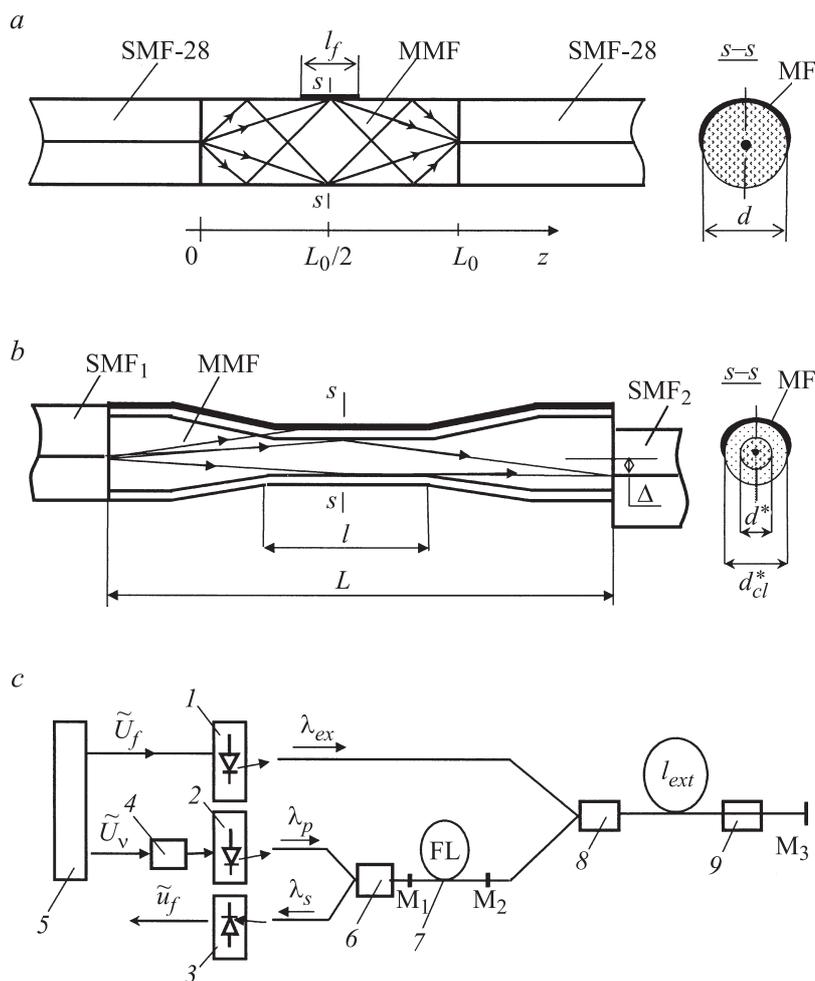


Рис. 1. Схемы световодных структур (a — SMS₁, b — SMS₂) и измерительной установки (c): 1 — источник возбуждающего модулированного излучения ($\lambda_{ex} = 1480$ nm); 2 — лазерный диод накачки ($\lambda_p = 980$ nm); 3 — фотоприемник; 4 — фазовращатель; 5 — генератор синусоидальных сигналов; 6 — волоконно-оптический 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 ММФ осуществляется за счет энергии модулированного излучения, распространяющегося в ММФ, часть которой поглощается металлической пленкой (МФ), 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 SMS₁ пленка нанесена в середине сегмента на небольшом участке, в SMS₂ — на половину поверхности перетяжки по всей длине, при этом поглощается часть излучения, высвечивающаяся из сердцевины в оболочку. В SMS₁ 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_{1,2} (в диапазоне 1400–1600 nm) показывают, что максимальные значения $T_{\max} = 15\text{--}45\%$, причем положение пика (λ_{\max}) и значения T_{\max} весьма чувствительны к параметрам сегментов ММФ: в структурах SMS₁ при фиксированных размерах сегментов (T_{\max} , λ_{\max}) зависят от толщины и оптических констант МФ; в SMS₂ 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 ММФ 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 ММФ, λ — длина волны света, $k = 1, 2, \dots$ [1]. При этом в сечениях ММФ 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 SMS₁ с пленкой малых размеров. С учетом многолучевой интерференции интенсивность излучения в приемном световоде определяется суперпозицией результирующих амплитуд попарно симметричных лучей, которые распространяются в сегменте ММФ вдоль определенных зигзагообразных линий (траекторий), формируя симметричные плечи интерферометра, сходящиеся в световедущей сердцевине SMF_{1,2}. Максимумы пропускания структур SMS соответствуют определенным длинам сегмента L_k , обеспечивающим формирование наибольшего количества синфазных (с точностью до 2π) 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 SMS₁ 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_{1,2}. За счет применения специальных пленочных структур, в принципе, можно обеспечить максимальную чувствительность интерферометров ($|\Delta\varphi_0| = \pi_2$) [5]. Таким образом, в структурах SMS₁ 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 SMS₂ необходимая чувствительность к изгибным колебаниям сегмента ММФ достигается оптимизацией рабочей точки интерферометров за счет поперечного смещения одного из световодов SMF_{1,2} относительно сегмента ММФ, т.е. несоосности структуры SMS₂. 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_{1,2} 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 SMF₂ 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 (M₂M₃), включающим структуру SMS, модуляция потерь $\Delta\tilde{T}$ и фазы световой волны $\Delta\tilde{\varphi}$ в структуре SMS, обусловленная колебаниями

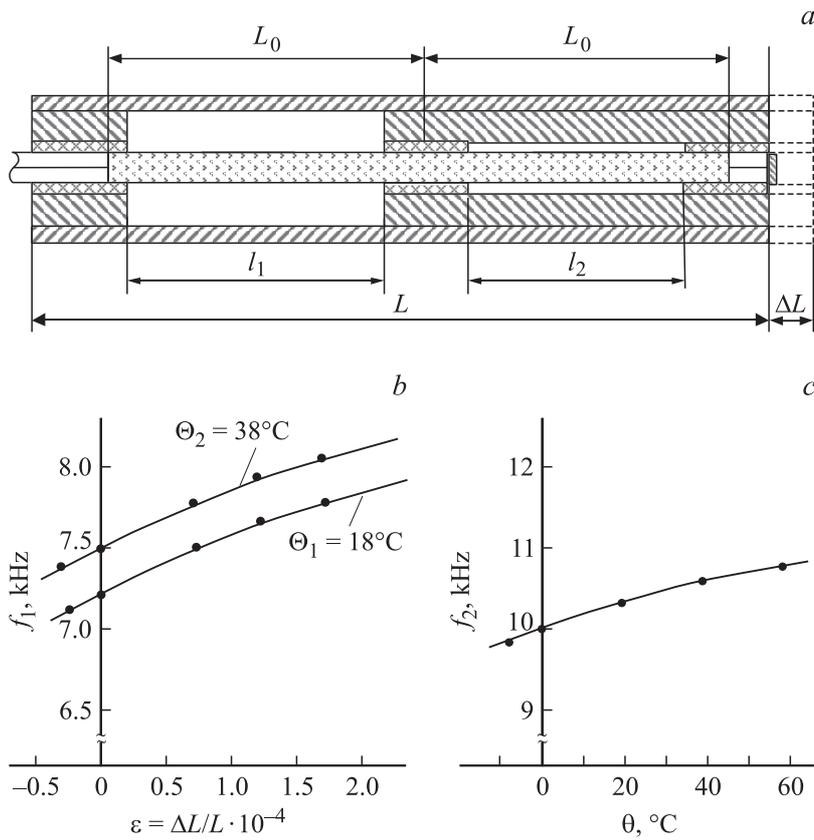


Рис. 2. Схема виброчастотного преобразователя деформаций и температуры на основе структур SMS (a); градуировочные кривые: b — $f_1(\varepsilon, \theta)$, c — $f_2(\theta)$.

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; γ_{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 ν — 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}_ν ($\nu = 2f$) 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 SMS₁ виброчастотных волоконно-оптических датчиков, разработанного для одновременного контроля деформаций ϵ и

температуры θ . 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.*