

## Оптическое мультиплексирование микрорезонаторных датчиков физических величин на основе волоконного лазера

© В.Д. Бурков<sup>1</sup>, Ф.А. Егоров<sup>2</sup>, Я.В. Малков<sup>1</sup>, В.Т. Потапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет леса, 141001 Мытищи, Московская область, Россия

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники РАН, 141120 Фрязино, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 13 августа 1998 г.)

Рассмотрен новый принцип построения мультиплексной системы автогенераторных микрорезонансных волоконно-оптических датчиков физических величин. Приведены результаты экспериментального исследования мультиплексной системы с двумя измерительными каналами.

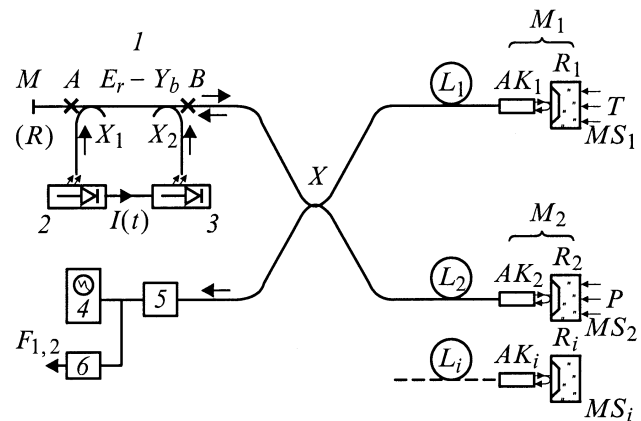
В работах [1,2] показано, что волоконно-оптические автогенераторные системы, основанные на резонансном взаимодействии эрбиевого волоконного лазера (ЭВЛ) с микромеханическими резонаторами  $MS$ , возбуждаемыми оптическим излучением, позволяют реализовать микрорезонаторные волоконно-оптические преобразователи (МВОП) физических величин с частотным кодированием информации. Необходимым условием резонансного взаимодействия в системе ЭВЛ- $MS$  является соотношение  $f_{rel} \approx f/n$ , где  $f_{rel}$  и  $f$  — соответственно частота релаксационных колебаний ЭВЛ и собственная частота микрорезонатора;  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Частота автомодуляции интенсивности ЭВЛ составляет  $F \approx f/n$ . При этом зоны существования автоколебаний представляют собой, как правило, дискретные области в пространстве параметров, характеризующих оптические, акустические и термоупругие свойства ЭВЛ и  $MS$ . В лазерах со сложными оптическими резонаторами возможно существование целого набора частот релаксационных колебаний, соответствующих различным модовым группам [3]. Следовательно, можно предположить, что в случае сложного оптического резонатора ЭВЛ, образованного многозеркальной системой на основе микрорезонаторов, возможно обеспечить резонансные условия для каждого из микрорезонаторов  $MS_i$ :  $f_{rel_i} \approx f_i$ . Это открывает возможности для построения мультиплексированной системы МВОП<sub>*i*</sub> на основе ЭВЛ.

Как известно [4], частота релаксационных колебаний интенсивности излучения ЭВЛ определяется соотношением

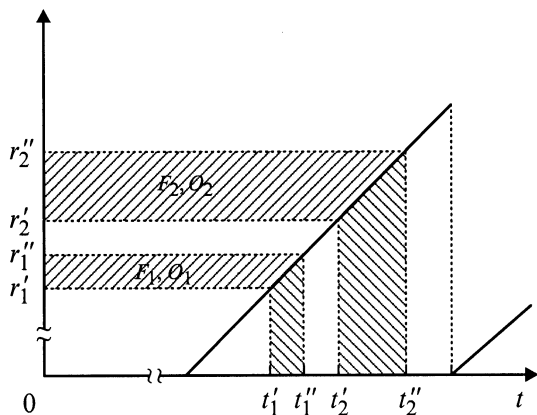
$$f_{rel} \approx [(r - 1)/\tau_{ph} \cdot \tau_M \cdot (1 + \sigma N c \tau_{ph} l / L)]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $r$  — относительный уровень накачки активной среды ЭВЛ;  $\tau$  — время жизни фотона в волоконном резонаторе ЭВЛ с длиной световода  $L$  и длиной активного световода  $l$ ;  $\tau_M$  — время жизни метастабильного уровня активной частицы;  $c$  — скорость света в волоконном световоде;  $N, \sigma$  — полная концентрация и сечение радиационного перехода между рабочими уровнями активных частиц.

Отметим, что соотношение (1) получено в предположении однородности накачки активного участка световода и изотропности волоконного резонатора. Время жизни фотона  $\tau_{ph} \approx 2L(\alpha - \ln R)$ , где  $\alpha - \ln R$  — коэффициент нерезонансных потерь оптического излучения за проход в волоконном резонаторе с учетом коэффициентов потерь и пропускания зеркал лазера. Из выражения (1) следует, что при заданных параметрах активной среды и оптических характеристиках резонатора величиной  $f_{rel}(r, L)$  можно управлять за счет изменения уровня накачки  $r$  и длины резонатора. Принцип предлагаемого метода мультиплексирования рассмотрим на примере функционирования двухканальной измерительной системы (рис. 1), которая может служить основой при разработке дифференциальных схем МВОП. В данном случае резонатор ЭВЛ, включающий одномодовый волоконный разветвитель  $X$ , является сложным (трехзеркальным), образованным из участков  $MXM_1$  и



**Рис. 1.** Блок-схема двухканальной мультиплексной системы: 1 — эрбиевый волоконный лазер; 2, 3 — ПЛ<sub>1</sub>, ПЛ<sub>2</sub> соответственно;  $I(t)$  — ток инжекции ПЛ<sub>1,2</sub>;  $X$  — одномодовый волоконно-оптический разветвитель;  $L_i$  — отрезки одномодовых световодов;  $AK_i$  — волоконные автоколлиматоры;  $MS_i$  — микрорезонаторы; 4 — анализатор спектра; 5 — фотоприемник; 6 — частотомер;  $M, M_i$  — зеркала сложного волоконного резонатора ЭВЛ.



**Рис. 2.** Зависимость относительного уровня накачки ЭВЛ от времени:  $O_{1,2}$  — зоны возбуждения автоколебаний с резонансными частотами микрорезонаторных структур  $F_{1,2} \approx f_{1,2}$ .

$MXM_2$ , представляющих собой парциальные резонаторы с соответствующими длинами  $L_{1,2}$  и потерями  $\alpha_{1,2}$ . Как известно [1,2], режим резонансной автомодуляции может наблюдаться при различных реализациях оптической обратной связи (ОС) между ЭВЛ и  $MS$ , например через интерферометр Фабри–Перо или через автоколлиматор (АК). Следовательно в рассматриваемой схеме в качестве зеркал  $M_{1,2}$  (коэффициенты отражения  $R_{1,2}$ ) могут применяться как интерферометры Фабри–Перо, так и автоколлиматоры с  $MS$ . В связи с тем, что МВОП на основе автоколлиматоров обладают повышенной устойчивостью к воздействию различных дестабилизирующих факторов, а также с практической точки зрения представляются более перспективными, в дальнейшем изложении мы ограничимся рассмотрением МВОП на основе автоколлиматоров. При этом роль зеркал  $M_{1,2}$  выполняют отражающие поверхности микрорезонаторов  $MP_{1,2}$ , характеризующихся собственными частотами  $f_{1,2}$ . При близких значениях оптических параметров участков  $MXM_{1,2}$  и эффективностей оптического возбуждения  $MP_{1,2}$  можно ожидать, что выполнение резонансных условий 1)  $f_{\text{rel}1} \approx f_1$  и 2)  $f_{\text{rel}2} \approx f_2$  в системе ЭВЛ– $MS_{1,2}$  приводит к автоколебаниям с частотой  $F_1 \approx f_1$  в первом случае и  $F_2 \approx f_2$  во втором, когда относительные уровни накачки ЭВЛ  $r_{1,2}$  находятся в интервалах, соответствующих дискретным зонам существования автоколебаний  $r_1 \in O_1 = (r_1'; r_1'')$ ;  $r_2 \in O_2 = (r_2'; r_2'')$ . Таким образом, возможно однозначно установить соответствие между состояниями возбуждения микрорезонаторов  $MS_{1,2}$  и уровнями накачки ЭВЛ при автоколебаниях: при  $r_1 \in O_1$  возбуждены автоколебания  $MS_1$ , а при  $r_2 \in O_2$  возбужден  $MS_2$ . При плавном увеличении относительного уровня накачки  $r(t)$  эволюция состояний рассматриваемой автогенераторной системы происходит в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 2. При достижении значения  $r_1'$ , соответствующего моменту времени  $t_1'$ , в системе в “мягком” режиме возбуждаются автоколебания с частотой  $F_1 \approx f_1$ , которые срываются в момент времени  $t_1''$  при достижении  $r_1''$ . В течение интервала

времени  $(t_1'' - t_1')$  система находится в невозбужденном состоянии. Далее, в момент времени  $t_2'$  при значении  $r_2'$  возбуждаются автоколебания с частотой  $F_2 \approx f_2$ , которые срываются при уровне накачки  $r_2''$  в момент времени  $t_2''$ . Затем накачка уменьшается до исходного значения, после которого можно снова повторить описанный выше цикл. Следует отметить, что существует ряд причин, ограничивающих скорость сканирования уровня накачки ЭВЛ. Во-первых, при резком повышении уровня накачки ЭВЛ с длительностью фронта нарастания  $< 10$  ms динамика генерации ЭВЛ приобретает достаточно сложный характер [5]. Во-вторых, промежутки времени  $(t_1'; t_1'')$  и  $(t_2'; t_2'')$ , в течение которых накачка находится в пределах зон возбуждения  $O_1(O_2)$ , должны превышать длительность времени установления стационарного режима автоколебаний в системе. Следовательно, при акустических добротностях  $MS_{1,2}$ , равных  $Q_{1,2}$ , необходимо выполнение соотношений  $(t_1'' - t_1') \gg Q_1/f_1$  и  $(t_2'' - t_2') \gg Q_2/f_2$ . В-третьих, для обеспечения необходимой точности измерения частоты автоколебаний требуется время измерения (усреднения), превышающее определенный минимальный интервал. Оценки показывают, что для микрорезонаторов с типичными параметрами  $Q_{1,2} = 100$ ,  $f_{1,2} > 50$  kHz ограничение скорости возрастания накачки  $dr/dt$  главным образом связано с первой из отмеченных причин, которая приводит к допустимой величине  $dr/dt \ll 10^2$  s $^{-1}$ . Таким образом, за счет сканирования уровня накачки волоконного лазера может осуществляться последовательное возбуждение и определение частоты автоколебаний в системе, что позволяет реализовать мультиплексирование МВОП.

Возможность оптического мультиплексирования МВОП исследовалась экспериментально с помощью установки, схема которой представлена на рис. 1. Средняя выходная мощность излучения ЭВЛ ( $\lambda = 1.54$   $\mu\text{m}$ ) с полупроводниковым лазером накачки (ПЛ,  $\lambda_p \approx 0.98$   $\mu\text{m}$ ) могла устанавливаться в пределах 0–40 mV. Активная среда ЭВЛ представляла собой отрезок одномодового световода АВ, легированного совместно эрбием ( $\text{Er}^{+3}$ ) и иттербием ( $\text{Yb}^{+3}$ ), где иттербий выполняет роль эффективного активатора. Оптическая накачка активной среды осуществлялась встречными потоками излучения полупроводниковых лазеров ПЛ $_{1,2}$  ( $\lambda_p = 0.98$   $\mu\text{m}$ ), которые вводились в активный световод с помощью волоконных разветвителей  $X_{1,2}$ . Данная симметричная схема накачки обеспечивает более однородное распределение интенсивности излучения накачки вдоль отрезка активного световода. Участок активного световода имеет длину  $l = 5$  m при концентрации эрбия  $N_{\text{Er}^{+3}} \approx 300$  ppm. Изменение полной длины волоконно-оптического резонатора ЭВЛ в широких пределах достигается за счет подсоединения отрезков пассивных одномодовых световодов к концам активного отрезка с помощью дуговой сварки в точках А и В. Типичные параметры отрезков пассивных световодов: числовая апертура  $NA \approx 0.15$ , диаметр сердцевины  $d_c \approx 6.5$   $\mu\text{m}$  (кварцевой оболочки  $D \approx 125$   $\mu\text{m}$ ), длина волны

отсечки  $\lambda_{\text{cut}} \approx 1.2 \mu\text{m}$ , потери на рабочей длине волны ( $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$ ) не более 0.5 dB/km. Пороговый ток инжекции ПЛ<sub>1,2</sub> составлял  $I_{\text{th}} \approx 110 \text{ mA}$ , при этом лазерная генерация ЭВЛ наблюдалась при токах  $I > I_g \approx 200 \text{ mA}$ , где зависимость выходной оптической мощности ПЛ<sub>1,2</sub> от тока инжекции описывается функцией, близкой к линейной. Величина тока  $I$  могла варьироваться в пределах 0–600 mA, что соответствует изменению относительного уровня накачки ЭВЛ, определяемой формулой  $r \approx (I - I_{\text{th}})/(I_g - I_{\text{th}})$  в пределах 0–5. Зависимость  $r(t)$ , показанная на рис. 2, в эксперименте реализовывались за счет задания соответствующей временной функции тока инжекции ПЛ<sub>1,2</sub>  $I(t)$ . В работе применялись МВОП с автоколлиматором на основе градиентных стержневых линз, формирующих коллимированные гауссовы пучки с эффективным диаметром 400–500  $\mu\text{m}$  и угловой расходимостью  $2-3 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$ . Потери в симметричном разветвителе  $X$  не превышали 0.5, при этом участок  $MXM_1$  имел длину  $L_1 = 12 \text{ m}$ , а длина участка  $MXM_2$  могла изменяться от 14 до 30 m. Эксперименты проводились с микрорезонаторами различных топологий (микромембрана, микроконсоль, микростик), изготовленных методом анизотропного травления монокристаллического кремния с собственными частотами поперечных колебаний и добротностью в диапазонах  $f = 20-170 \text{ kHz}$ ,  $Q = 50-200$  (в воздухе) [2]. В качестве зеркал составных микрорезонаторов применялись тонкие пленки различных металлов (Al, Ni, Ti и т.д.) с толщинами 20–300 nm сформированных на поверхностях  $MS$  методом магнетронного напыления. Необходимая исходная ориентация  $MS$  относительно коллимированного пучка устанавливалась с помощью угловых и линейных юстировочных устройств. Отметим, что в рассматриваемых системах ЭВЛ– $MS$  автоколебания с частотой  $F \approx f = 170 \text{ kHz}$  возбуждались в случае микрорезонаторов, имеющих достаточно значительную толщину  $h \approx 20 \mu\text{m}$ , в которых глубина затухания температурной волны составляет  $\delta = 13 \mu\text{m}$ , что соответствует отношению  $h/\delta \approx 1.6$ . Это подтверждает высокую эффективность метода возбуждения автоколебаний  $MS$ , основанного на ее резонансном взаимодействии с волоконным лазером. В исследованных системах ЭВЛ– $MS_{1,2}$  применялись микрорезонаторы с нецелочисленным отношением частот  $f_2 : f_1 (f_2 : > f_1)$ . Это связано с тем, что при кратном соотношении  $f_2 : f_1 = m$ , где  $m$  — натуральное число, в силу существенной нелинейности рассматриваемой системы возможно взаимное влияние между измерительными каналами, обусловленное наличием в спектре модуляции интенсивности ЭВЛ ультра- и субгармоник резонансных частот микрорезонаторов. Можно ожидать, что в случае значительных отстройек собственных частот  $MS_{1,2}$ , удовлетворяющих условию  $|f_2 - mf_1| \gg (f_2 Q_2 + mf_1 Q_1)$ . Отмеченное влияние будет несущественно. На рис. 3 приведены экспериментальные результаты,

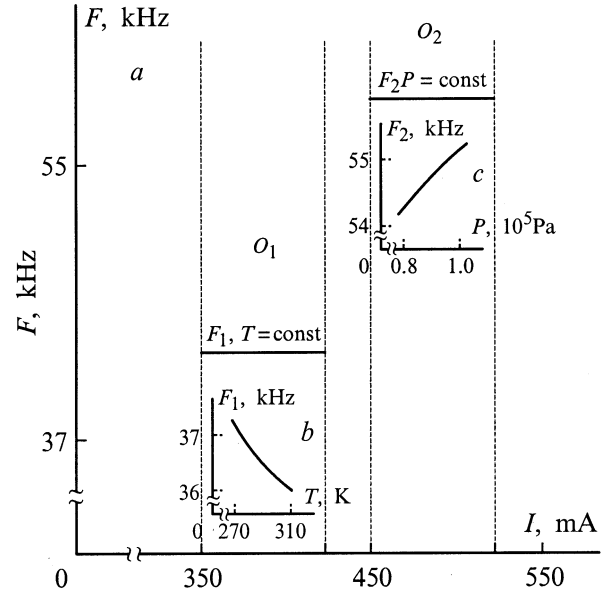


Рис. 3. Зависимость частоты выходного сигнала фотоприемника от тока накачки ЭВЛ (a), функции преобразования температуры (b) и давления (c).

полученные при исследовании систем ЭВЛ– $MS_{1,2}$ , где собственные частоты  $MS_{1,2}$  с топологией "микростик" и "микростик на микромембране" составляли  $f_1 \approx 37$  и  $f_2 = 55 \text{ kHz}$ . Зависимости частоты сигнала на выходе фотоприемника от тока инжекции ПЛ, приведенные на рис. 3, получены при скоростях сканирования тока инжекции, не превышающих 1 A/s. При значениях  $I \in 350-420 \text{ mA}$  в рассматриваемой системе ( $L_1 = 12 \text{ m}$ ,  $L_2 = 14 \text{ m}$ ) возникают автоколебания с частотой  $F_1 \approx f_1$ . Срыв автоколебаний происходит при токе  $I = 420 \text{ mA}$ , при этом в интервале значений 420–450 mA автоколебания отсутствуют. Дальнейшее увеличение накачки ЭВЛ приводит к установлению автоколебательного режима с собственной частотой  $MS_2$   $F_2 \approx f_2$ , срыв которого происходит при  $I = 530 \text{ A}$ . Таким образом, в соответствии с представлениями, изложенными выше, при сканировании накачки ЭВЛ происходит последовательное возбуждение автоколебаний с собственными частотами микрорезонаторов. Необходимо отметить, что в рассматриваемых системах ЭВЛ– $MS_{1,2}$  в режиме автоколебаний отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника в полосе 100 kHz, как правило, составляет 20–30 dB, что меньше, чем в системах с двухзеркальным резонатором ЭВЛ– $MS$  [1]. Установление механизмов уменьшения шумов требует дальнейших исследований, однако ясно, что одна из причин их возрастания связана с сильным взаимодействием модовых групп парциальных резонаторов через активную среду ЭВЛ.

Примечательно, что в рассматриваемых системах ЭВЛ– $MS_{1,2}$  при внешних воздействиях на микрорезонаторы, изменяющих в ограниченных пределах  $\Delta f_{1,2}$

( $|\Delta f_{1,2}/f_{1,2}| < 0.1$ ) их собственные частоты соотношения  $F_1 \approx f_1$ ;  $F_2 \approx f_2$  выполняются как при независимых воздействиях на  $MS_{1,2}$ , так и при одновременных воздействиях с сохранением вида функций преобразования индивидуальных измерительных каналов  $\Delta F_{1,2}/F_{1,2} \approx \Delta f_{1,2}/f_{1,2}$  (рис. 3) с относительным уровнем флуктуаций частот, составляющим  $\langle \Delta F_{1,2}/F_{1,2} \rangle < 2 \cdot 10^{-4}$ . Это свойство позволяет считать рассматриваемые системы в качестве базовых при разработке мультиплексных микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков физических величин. Отметим, что с принципиальной точки зрения предлагаемый метод мультиплексирования допускает увеличение количества измерительных каналов системы. Для этого необходимо оптимизировать параметры элементов мультиплексной системы (ЭВЛ,  $MS$ , автоколлиматорной системы, одномодовых световодов) с целью достижения максимального количества зон возбуждения автоколебаний индивидуальных  $MS$  в заданном ограниченном интервале допустимых изменений уровня накачки ЭВЛ.

## Список литературы

- [1] Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потапов В.Т. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 6. С. 33–39.
- [2] Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Малков Я.В., Потапов В.Т. // Радиотехника. 1998. № 3. С. 36–40.
- [3] Otsuka K. // Proc. SPIE. 1993. Vol. 2039. P. 182–197.
- [4] Salcedo I.R., Sousa I.M., Kusmin V.V. // Appl. Phys. B 1996. Vol. 62. P. 83–85.
- [5] Rangel-Rojo R., Mohebi M. // Opt. Commun. 1997. Vol. 137. P. 98–102.