

07;12

Оптическое мультиплексирование микрорезонаторных датчиков физических величин на основе волоконного лазера

© В.Д. Бурков¹, Ф.А. Егоров², Я.В. Малков¹, В.Т. Потапов²

¹ Московский государственный университет леса, 141001 Мытищи, Московская область, Россия

² 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_{*i*} 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; τ — время жизни фотона в волоконном резонаторе ЭВЛ с длиной световода L и длиной активного световода l ; τ_M — время жизни метастабильного уровня активной частицы; c — скорость света в волоконном световоде; N, σ — 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

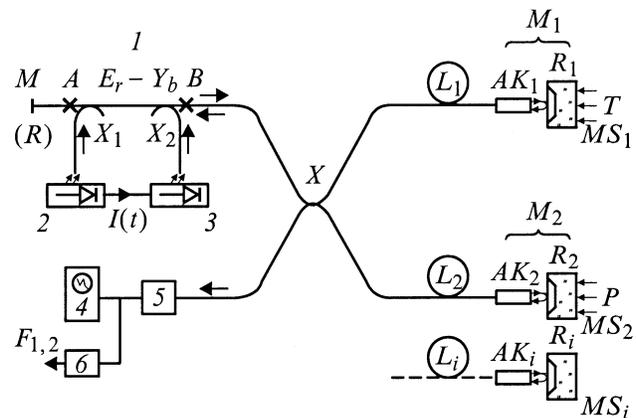


Рис. 1. Блок-схема двухканальной мультиплексной системы: 1 — эрбиевый волоконный лазер; 2, 3 — ПЛ₁, ПЛ₂ соответственно; $I(t)$ — ток инжекции ПЛ_{1,2}; X — одномодовый волоконно-оптический разветвитель; L_i — отрезки одномодовых световодов; AK_i — волоконные автоколлиматоры; MS_i — микрорезонаторы; 4 — анализатор спектра; 5 — фотоприемник; 6 — частотомер; M, M_i — зеркала сложного волоконного резонатора ЭВЛ.

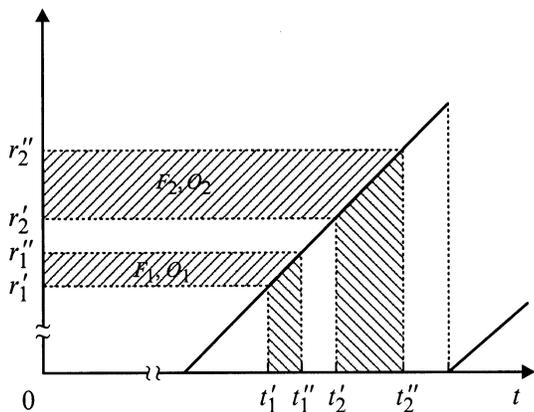


Рис. 2. Зависимость относительного уровня накачки ЭВЛ от времени: $O_{1,2}$ — зоны возбуждения автоколебаний с резонансными частотами микрорезонаторных структур $F_{1,2} \approx f_{1,2}$.

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 ($\lambda = 1.54$ μm) с полупроводниковым лазером накачки (ПЛ, $\lambda_p \approx 0.98$ μm) могла устанавливаться в пределах 0–40 mV. Активная среда ЭВЛ представляла собой отрезок одномодового световода АВ, легированного совместно эрбием (Er^{+3}) и иттербием (Yb^{+3}), где иттербий выполняет роль эффективного активатора. Оптическая накачка активной среды осуществлялась встречными потоками излучения полупроводниковых лазеров ПЛ $_{1,2}$ ($\lambda_p = 0.98$ μm), 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 $d_c \approx 6.5$ μm (кварцевой оболочки $D \approx 125$ μm), 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_{1,2} 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_{1,2} 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_{1,2} $I(t)$. В работе применялись МВОП с автоколлиматором на основе градиентных стержневых линз, формирующих коллимированные гауссовы пучки с эффективным диаметром 400–500 μm 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,

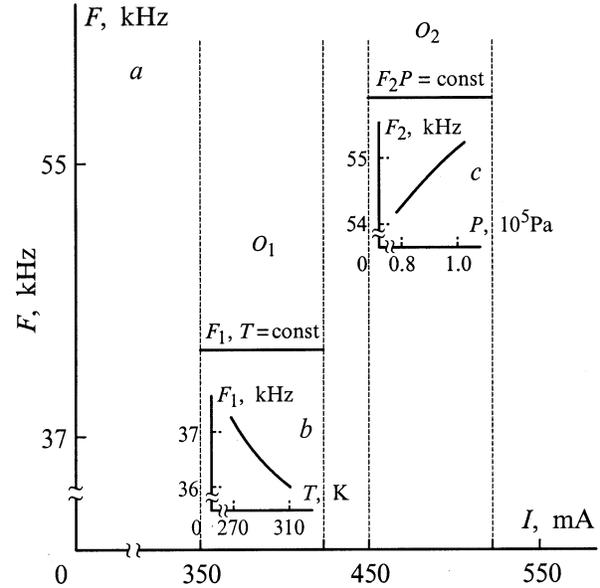


Рис. 3. Зависимость частоты выходного сигнала фотоприемника от тока накачки ЭВЛ (a), функции преобразования температуры (b) и давления (c).

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.