

07:08:09:12

Автоколебания в системе волоконный лазер–коллиматор–микрорезонатор

© В.Д. Бурков, Ф.А. Егоров, В.Т. Потапов

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 1 ноября 1996 г.

В работе предложена и экспериментально исследована схема волоконно-оптического автогенератора, характеризующегося повышенной стабильностью "рабочей точки" автогенератора. Предложенная схема представляется перспективной для создания волоконно-оптических датчиков физических величин с частотным выходом.

В работах [1,2] показано, что в лазере с дополнительным зеркалом в виде оптически возбуждаемого микромеханического резонатора (МР) возможен автоколебательный режим с резонансной частотой механических колебаний МР (f). Свойства системы качественно можно объяснить в рамках модели пассивной модуляции добротности оптического резонатора (ОР): колебания МР приводят к модуляции эффективного коэффициента отражения интерферометра Фабри–Перо R , образованного зеркалом оптического резонатора и отражающей поверхностью микромеханического. При этом вследствие сложной зависимости спектральных характеристик трехзеркального оптического резонатора от его геометрических параметров имеет место модуляция не только амплитуды, но и фазы коэффициента отражения интерферометра. Зависимость R от фазового набегает приводит к образованию дискретных зон существования автоколебаний, периодичных с периодом интерферометра, равным $\lambda/2$ (λ — длина волны лазера). В результате внешних возмущений на интерферограмме может иметь место дрейф "рабочей точки" автогенератора из зоны существования и как следствие срыв автоколебаний. В данной работе предложена и экспериментально исследована схема пассивной модуляции добротности лазера с помощью микромеханического резонатора, в которой основную роль играет именно модуляция амплитуды коэффициента отражения.

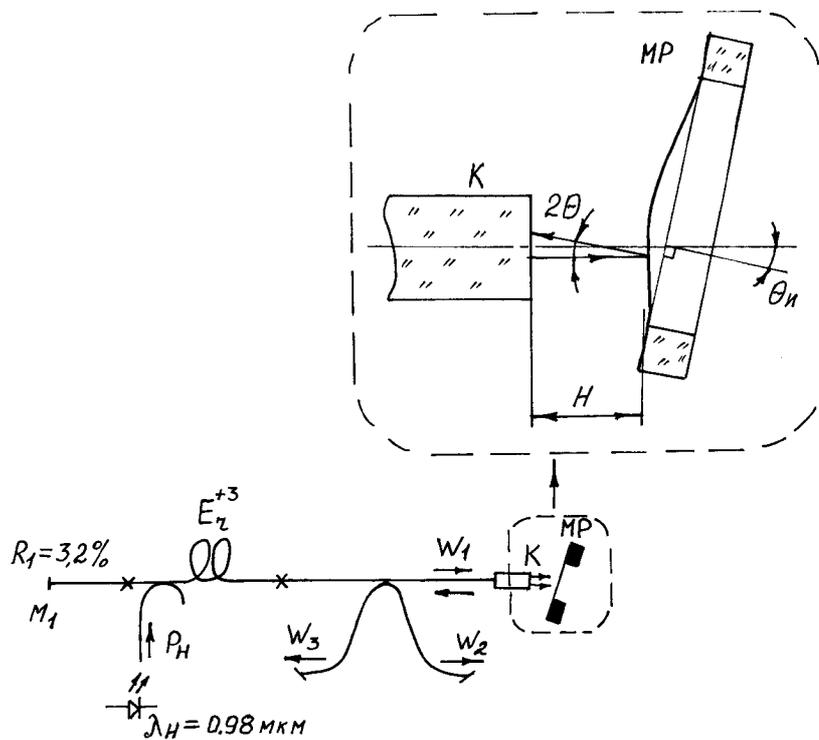


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Рассматриваемая схема приведена на рис. 1. Ее работа основана на модуляции добротности двухзеркального оптического резонатора вследствие фотоиндуцированных угловых отклонений одного из зеркал, в качестве которого служит микромеханический резонатор. Активная модуляция добротности лазера с помощью наклоняющегося зеркала рассмотрена в работе [3], в которой показана ее высокая эффективность: углы отклонения в пределах $9'$ приводят к 100%-й глубине модуляции выходной мощности лазера. Эксперименты проводились с эрбиевым волоконно-оптическим лазером, основные параметры которого приведены в работе [1]. В нашем случае зеркалом M_1 служила граница раздела

световод–воздух ($R_1 \approx 3.2\%$); частота межмодовых биений волоконно-оптического лазера составляла 12 МГц. Часть мощности оптического пучка, формируемого коллиматором К, отражается от поверхности МР, составляющей угол θ с осью пучка, и возвращается обратно в волоконно-оптический резонатор лазера. Изменение мощности излучения лазера W_1 , падающего на МР, приводит, вследствие эффекта фотоиндуцированной деформации, к модуляции угла отклонения отраженного пучка $\theta(t)$, т. е. модуляции $\eta(\theta(t))$. В качестве коллиматора применялись градиентные стержневые линзы в четверть периода, формирующие гауссовы пучки с параметрами: 1) диаметр перетяжки пучка $2w_0 = 780$ мкм, угол расходимости $2\theta_0 \approx 2.6 \cdot 10^{-3}$ рад; 2) $2w_0 = 440$ мкм, $2\theta_0 \approx 4.0 \cdot 10^{-3}$ рад. Остаточный коэффициент отражения линзы не превышал 0.2%, а вносимые потери составляли ≈ 0.4 дБ. Контроль состояния лазера осуществлялся с помощью несимметричного (1:3) одномодового "X" ответвителя с потерями ≈ 0.5 дБ. Микромеханические резонаторы представляли собой кремниевые микромембраны, микромостики и микроконсоли, полученные методом анизотропного травления, основные характеристики которых приведены в работе [1]. Экспериментальная зависимость $\eta(\theta)$ приведена на рис. 2. Изменение расстояния H между линзой и резонатором не приводило к заметным изменениям выходных оптических сигналов W_2, W_3 , что доказывает отсутствие существенных интерференционных эффектов.

Основные экспериментальные результаты. Независимо от топологии и конструкции механического резонатора при выполнении определенных условий в рассматриваемой системе устанавливается автоколебательный режим с частотой F , практически совпадающей с его резонансной частотой $f \approx F$. Данные условия сводятся к следующим: 1) в исходном состоянии угол отклонения θ_i находится в интервале $\theta_1 \lesssim \theta_i \lesssim \theta_2$, где границы интервала (θ_1, θ_2) зависят от характеристик механического резонатора лазера; 2) резонансная частота резонатора близка к частоте релаксационных колебаний лазера $f_{\text{рел}}$ или ее гармоникам: $f \approx n \cdot f_{\text{рел}}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Отметим, что $f_{\text{рел}}$ определяется относительной накачкой $r = P_n/P_{\text{н.л}}$, где $P_{\text{н.л}}$ — пороговый уровень накачки лазера [4]; 3) средняя мощность излучения \bar{W}_1 превышает определенный пороговый уровень $\bar{W}_{1\text{п}}$, зависящий от характеристик механического и волоконного резонаторов.

На рис. 2 приведены экспериментальные результаты, полученные для механического резонатора в виде микромостика с размерами

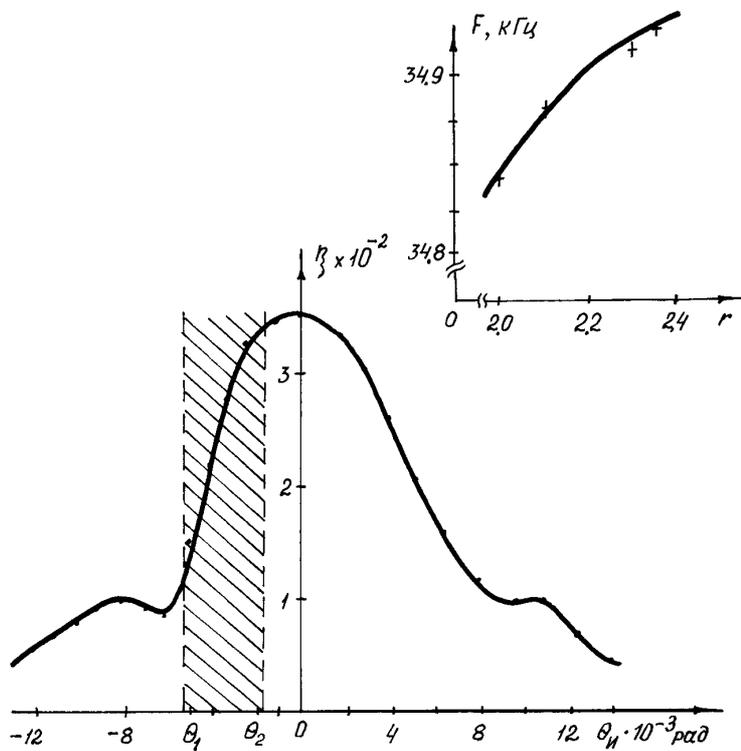


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\eta(\theta_n)$ и $F(r)$

1650×400×6 мкм с пленкой никеля (Ni) в качестве отражающего покрытия с коэффициентом отражения 72% (толщина пленки $h_{\text{Ni}} \approx 0.3$ мкм). Благодаря значительной ширине резонатора обеспечивалось его эффективное взаимодействие с оптическим пучком. В рассматриваемом случае возбуждались автоколебания с частотами $F_1 \approx 35.5$ кГц и $F_2 \approx 112.2$ кГц, соответствующие резонансным частотам основной и второй моды колебаний механического резонатора, регистрируемых с помощью волоконно-оптического интерферометра [1]. Средняя мощность \bar{W}_1 составляла 1.5–4.0 мВт, отношение сигнал/шум в системе

40–50 дБ. Амплитуда колебаний составляла $\lesssim 30$ нм. Добротности данных мод, измеренные при акустическом возбуждении колебаний, составляли соответственно 90 и 120. Как видно из рис. 2, область существования автоколебаний (θ_1, θ_2) для основной моды колебаний расположена целиком на одной ветви кривой $\eta(\theta)$. Это указывает на то, что модуляция добротности оптического резонатора главным образом обусловлена модуляцией угла отклонения пучка, а не дополнительной его фокусировкой (дефокусировкой) вследствие искривления поверхности МР при автоколебаниях. Отметим, что в случае более высоких мод колебаний, в зависимости от типа механического резонатора, эти области могут состоять из отдельных интервалов. На рис. 2 ширина интервала $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \approx 4 \cdot 10^{-3}$ рад, которая с ростом угла расходимости пучка, как правило, уменьшается. Примечательно, что при изменении H как в субмикронном диапазоне, так и в значительных пределах (± 1.5 мм) срыва автоколебаний не наблюдалось, при этом нестабильность частоты $\Delta F/F \lesssim 3 \cdot 10^{-4}$. В пределах интервала (θ_1, θ_2) наблюдается слабая зависимость $F(\theta_n)$, характер монотонности которой зависит от угловых и линейных геометрических параметров, характеризующих пространственную ориентацию оптического пучка относительно механического резонатора. Зависимость частоты автоколебаний от накачки $F(r)$, полученная при фиксированных пространственных параметрах системы, приведена на рис. 2. На наш взгляд, эту монотонную зависимость можно объяснить эффектом затягивания частоты механического резонатора релаксационными колебаниями лазера, частота которых с ростом P_n повышается. При вариациях параметров системы режим возбуждения автоколебаний ("мягкий" или "жесткий") зависит от конкретного типа изменяемого параметра.

На рис. 3 приведена зависимость частоты автоколебаний от температуры микромостика T , которая изменялась с помощью элемента Пелтье в диапазоне температур 10–70 °С. Микромеханический резонатор с пленкой Ni имел размеры $1400 \times 300 \times 6$ мкм; резонансная частота основной моды при комнатной температуре $f \approx 56.3$ кГц. При вариации температуры в данном интервале значений система все время находилась в режиме стабильных автоколебаний. Как видно из рис. 3, функция $F(T)$ является практически линейной с температурным коэффициентом $K_T = 1/F dF/dT \approx -0.08\% \text{K}^{-1}$. Отрицательный знак K_T , вероятно, связан с тем, что эффективный коэффициент теплового расширения $\alpha_{\text{эф}}$ микромеханического резонатора, представляющего собой слоистую

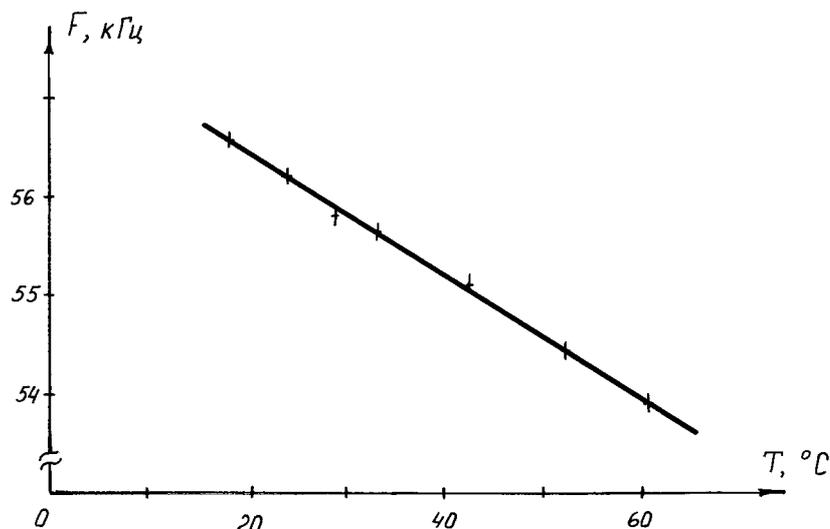


Рис. 3. Экспериментальная зависимость $F(T)$.

структуру из кремния и никеля, превышает коэффициент теплового расширения кремниевого основания микромостика α_{Si} :

$$\alpha_{эф}/\alpha_{Si} = (1 + E_{Ni}h_{Ni}\alpha_{Ni}/E_{Si}h_{Si}\alpha_{Si}) (1 + E_{Ni}h_{Ni}/E_{Si}h_{Si})^{-1},$$

где E_{Ni} , E_{Si} , h_{Ni} , h_{Si} — модули Юнга и толщины никеля и кремниевого механического резонатора соответственно.

Поскольку $\alpha_{Ni} = 13.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{Si} = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, то очевидно, что $\alpha_{эф} > \alpha_{Si}$. Вследствие этого при повышении температуры микромостик подвергается действию продольных напряжений, уменьшающих резонансную частоту [5]. Зависимость частоты составного механического резонатора от физических параметров пленок позволяет, таким образом, исследовать их свойства.

В данной работе показано, что: 1) для существования режима автоколебаний в системе лазер–микромеханический резонатор достаточно модуляции амплитуды коэффициента отражения оптического резонатора лазера; 2) предложенный способ реализации оптической обратной связи

между лазером и механическим резонатором обеспечивает высокую стабильность рабочей точки автогенератора; 3) рассмотренная волоконно-оптическая система позволяет измерять параметры окружающей среды (например, температуру) и исследовать физические свойства пленочных структур.

Список литературы

- [1] Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потапов В.Т. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 18. С. 16–21.
- [2] Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потапов В.Т. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 19. С. 18–22.
- [3] Белова Г.Н., Ремизова Е.И. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 1. С. 192–194.
- [4] Цикунов В.Н. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. В. 5. С. 1646–1650.
- [5] Walsh D., Culshaw B. // Sensors and Actuators A. V. 25–27. P. 711-716.