

06.3;07;12

## ЭФФЕКТ АВТОМОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ ЛАЗЕР — МИКРОРЕЗОНАТОР

© В.Д.Бурков, Ф.А.Егоров, В.Т.Потапов

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков автогенераторного типа [1]. Микрорезонатор (МР) представляет собой, с одной стороны, механический осциллятор с микронными размерами, с другой стороны, в оптических схемах выполняет роль зеркала с заданным коэффициентом отражения (поглощения). При этом резонансная частота механических колебаний МР может зависеть от внешнего воздействия (температура, давление, ускорение и т. д.). В данной работе рассматривается новый принцип построения подобных систем на эффекте возникновения автомодуляции в лазере за счет оптической обратной связи через интерферометр Фабри-Перо между лазером и микрорезонатором. При этом выходная мощность лазера модулируется с резонансной частотой упругих колебаний МР, независимо от механизма оптического возбуждения колебаний МР.

Рассматриваемая система схематически представлена на рис. 1. В данной схеме МР представлен в виде дополнительного зеркала  $M_3$  (коэффициент отражения  $Z_3$ ) для оптического резонатора лазера (РЛ) длиной  $L$ , образованного зеркалами  $M_1, M_2$  (коэффициенты отражения соответственно  $r_2, r_3$ ) и активной средой (А.С.). Оптическое излучение лазера с интенсивностью  $J$ , падающее (поглощенное) на МР, приводит к возникновению механической силы  $F_x = k \cdot J$ , действующей на МР, при этом коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от конкретного механизма оптического возбуждения МР [1].

Таким образом, смещение зеркала  $M_3$   $x$  относительно исходного положения  $H_0$  зависит от интенсивности лазера. В то же время  $J$  зависит от эффективного коэффициента отражения системы зеркал ( $M_2, M_3$ )  $R_{\text{эф}}$ , в свою очередь зависящего от базы  $H = H_0 + x$  интерферометра Фабри-Перо (ИФП), образованного данными зеркалами. Следовательно, через ИФП формируется оптическая обратная связь между лазером и МР. Отметим, что введение  $R_{\text{эф}}$  в случае движущегося зеркала  $M_3$  корректно, если, во-первых, период колебаний МР  $T$  существенно превышает время полного

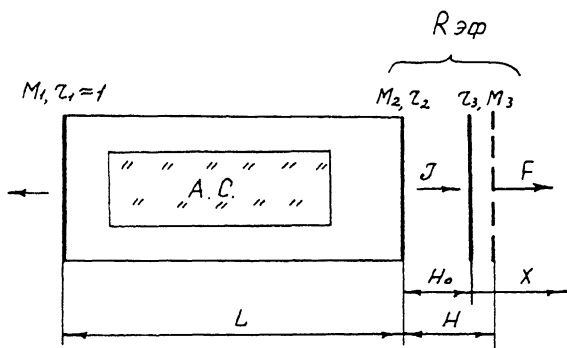


Рис. 1. Оптическая схема лазера с МР.  $M_1, M_2$  — зеркала лазера с коэффициентами отражения соответственно  $r_1, r_2$  ( $r_1 \approx 1$ );  $M_3$  — подвижное зеркало (МР) с коэффициентом отражения  $r_3$ ; А.С. — активная среда лазера.

пробега светом резонатора лазера  $2(L + H)/c \ll T$ ,  $c$  — скорость света в РЛ. Во-вторых, можно пренебречь Допплеровским смещением частоты света, отраженного от МР.

Оценки показывают, что отмеченные условия на практике выполняются. Модуляция  $R_{эф}$ , возникающая при колебаниях МР, приводит к модуляции добротности (потерь) РЛ. В случаях  $r_3 \ll r_2$  ( $r_3 \gg r_2$ ), как показано в работе [2],

$$R_{эф} \approx R + r \cos \left( \varphi_0 + \frac{4\pi x}{\lambda} \right),$$

где  $\lambda$  — длина волны лазера;  $\varphi_0 = \frac{4\pi H_0}{\lambda}$ ; функции  $r(r_2, r_3)$  и  $R(r_2, r_3)$  удовлетворяют условию  $r \ll R$ . В этом случае потери резонатора лазера  $\gamma$  можно представить в виде [3]:

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma(x), \quad \Delta\gamma(x) \ll \gamma_0, \quad (1)$$

где

$$\gamma_0 = \frac{c}{L}(\beta - \ln R); \quad \Delta\gamma(x) = \frac{c}{2L} \cdot \frac{r}{R} \cos \left( \varphi_0 + \frac{4\pi x}{\lambda} \right);$$

$\beta$  — нерезонансные потери РЛ.

Подчеркнем, что условия  $r_3 \ll r_2$  ( $r_1 \gg r_2$ ) с точки зрения поведения системы не играют принципиальной роли, однако существенно упрощают ее анализ. При непрерывной накачке лазера рассматриваемая система является автономной и описывается системой уравнений, включающих уравнение

линейного механического осциллятора и скоростные уравнения лазера [3]:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{\omega_{0i}}{Q_i} \dot{x} + \omega_{0i}^2 x = F_x = k \cdot J & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \ddot{J} + \frac{\alpha}{\tau} \dot{J} + \omega_1^2 J = F_J(\dot{x}, x), & (3) \end{cases}$$

где

$$F_J(\dot{x}, x) = -\frac{\omega_1^2}{2\sigma\gamma_0} \left( \Delta\dot{\gamma}(x) + \frac{\alpha}{\tau} \Delta\gamma(x) \right).$$

В соответствии с (1) лазерное уравнение (3) получено в приближении малой глубины модуляции добротности РЛ. В уравнении (3)  $\tau$  — время жизни метастабильного уровня лазера;  $\alpha$  — относительное превышение порога накачки лазера ( $\alpha > 1$ );  $\omega_1 = \left[ \frac{(\alpha-1)\gamma_0}{\tau} \right]^{1/2}$  — частота релаксационных колебаний лазера;  $\sigma$  — площадь сечения поглощения активной частицы лазера;  $\omega_{0i}$ ,  $Q_i$  — соответственно резонансная частота и добротность;  $i$  — моды собственных колебаний МР.

Функцию  $F_J(\dot{x}, x)$  в уравнении (3) можно представить в виде (в условиях квадратуры ИФП):

$$F_J(\dot{x}, x) = A \left[ \dot{x} \cos \frac{4\pi x}{\lambda} + \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\alpha}{\tau} \cdot \sin \frac{4\pi x}{\lambda} \right], \quad (4)$$

где

$$A = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{\omega_1^2}{\sigma\gamma_0} \cdot \frac{c}{L} \cdot \frac{\tau}{R} \sin \varphi_0.$$

Система уравнений (2), (3), по существу, описывает поведение двух связанных осцилляторов с затуханием (считаем, что  $Q_i \gg 1$ ;  $\omega_1\tau/\alpha \gg 1$ ), имеющих собственные частоты  $\omega_{0i}$  и  $\omega_1$ . В отсутствие связи стационарные колебания в системе невозможны. Однако наличие связи, как известно [4], может существенно изменить картину поведения, ее влияние особенно значительно в условиях резонанса  $\omega_{0i} \approx \omega_1$ . В этом случае в системе могут иметь место автоколебания с частотой, равной собственной частоте связанной системы осцилляторов:

$$\omega \approx \omega_{0i} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{kA \cdot \alpha}{\omega_{0i}^4 \cdot \tau}} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

При этом колебания МР и интенсивности лазера происходят синхронно. В формуле (5) затуханием осцилляторов

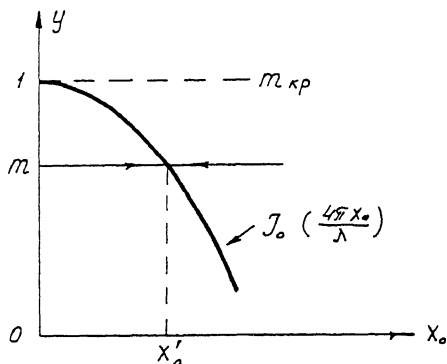


Рис. 2. Графический метод определения амплитуды колебаний МР.

пренебрегается. Амплитуда колебаний МР  $x'_0$  определяется из уравнения:

$$J_0\left(\frac{4\pi x'_0}{\lambda}\right) \approx m, \quad (6)$$

где

$$m = \left[ \frac{\omega_{0i}}{Q_i} + \frac{1}{\tau} + \frac{\omega_{0i}^2}{\gamma_0} \right] \cdot \left[ \frac{1}{R \cdot A} \left( \frac{1}{\tau} + \frac{\omega_{0i}^2}{\gamma_0} \right) \right]^{1/2},$$

$J_0$  — функция Бесселя 0-го порядка.

Графический метод решения уравнения (6) приведен на рис. 2.

Анализ уравнений (5), (6) приводит к ряду выводов.

- 1) Уравнение (5) имеет действительный корень только при  $\sin \varphi_0 \geq 0$ , т. е. на возрастающей ветви  $R_{\text{эф}}(H_0)$ .
- 2) В случае слабой связи осцилляторов  $\left( \frac{K \cdot A \cdot \alpha}{\omega_{0i}^2 \cdot \tau} \ll 1 \right)$  получим  $\omega \approx \omega_{0i}$ , т. е. автоколебания происходят практически на резонансной частоте МР.
- 3) По параметру  $H_0$  решения обладают трансляционной симметрией с периодом ИФП  $\lambda/2$ .
- 4) Для существования автоколебаний необходимо выполнение условия  $m < m_{\text{кр}} = 1$  (рис. 2).

Резонансные частоты МР, применяемых в ВОД, составляют 0.01–1 МГц. В настоящее время имеется ряд твердотельных, волоконно-оптических лазеров [5], частоты релаксационных колебаний которых могут находиться в данном диапазоне частот. Численные оценки, полученные из соотношений (5), (6), показывают, что, например, в случае кремниевого МР в виде консоли с размерами  $500 \times 15 \times 3$  мкм<sup>3</sup> с резонансной частотой основной моды  $\sim 30$  кГц при оптическом возбуждении МР за счет силы давления света [6],

автоколебания в системе рассматриваемого типа имеют место при  $Q \gtrsim 30$  и средней оптической мощности, падающей на МР,  $P \gtrsim 3$  мВт.

Тот факт, что частота автоколебаний в рассматриваемой системе практически совпадает с резонансной частотой МР, позволяет рассматривать подобные системы в качестве потенциально возможных микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков различных физических величин с частотным выходом, если в системе используется волоконный лазер. В силу нелинейной зависимости выходной мощности от добротности резонатора лазера даже незначительная глубина модуляции коэффициента отражения  $r/R$  может приводить к 100% глубине модуляции выходной мощности лазера при автоколебаниях. Это позволяет существенно повысить отношение сигнал-шум в данной системе, а также реализовать частотный выход измерительной информации.

### Список литературы

- [1] *Culshaw B.* // Sensors and Actuators. 1995. А 46-476. Р. 463-469.
- [2] *Бакаев А.А., Чебуркин Н.В.* Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. № 7. С. 1302-1307.
- [3] *Цикунов В.Н.* // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. Вып. 5. С. 1646-1650.
- [4] *Блакьер О.* Анализ нелинейных систем. М.: 1969. 400 с.
- [5] *Барнард С. et al.* // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. N 8. P. 1817-1830.
- [6] *Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Шаталин С.В.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 60-63.

Институт радиотехники  
и электроники РАН,  
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию  
19 июня 1996 г.