

## Особенности автомодуляции излучения волоконных лазеров с микрорезонаторными зеркалами

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

Институт радиотехники и электроники РАН,  
141120 Фрязино, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 17 декабря 2003 г. В окончательной редакции 7 июня 2004 г.)

Экспериментально исследована структура зоны возбуждения автоколебаний в системах эрбиевый волоконный лазер–микрорезонатор, определены зависимости частоты автоколебаний от параметров системы. Изучены особенности автоколебаний в условиях одновременного взаимодействия излучения лазера с несколькими микрорезонаторами.

В настоящее время технология микроэлектроники позволяет создавать оптические элементы на основе микромеханических резонансных структур (МРС), которые благодаря ряду уникальных свойств могут эффективно применяться для управления параметрами оптического излучения [1]. Использование микроструктур, возбуждаемых светом, в качестве оптических элементов резонатора волоконного лазера (ВЛ), например зеркал, позволяет существенно воздействовать на динамику генерации ВЛ, при этом взаимодействие лазера с МРС (микрорезонатором) может осуществляться через оптически перестраиваемый интерферометр Фабри–Перо или автоколлиматор на основе микрорезонаторов. Это влияние обусловлено в основном пассивной модуляцией добротности резонатора ВЛ, а также доплеровским смещением частоты излучения, отраженного от микрорезонаторных зеркал. Кинетика интенсивности излучения ВЛ в значительной степени определяется соотношением между собственными частотами упругих (акустических) колебаний микрорезонатора  $f$  и релаксационных колебаний лазера  $f_{\text{rel}}$ . Большой практический интерес представляет автомодуляционный режим, возникающий в условиях резонанса  $f_{\text{rel}} \cong f$  (кратного резонанса  $f_{\text{rel}} \cong f/N$ ;  $N = 2, 3, \dots$ ), открывающий возможности для создания широкого класса автогенераторных волоконно-оптических измерительных систем [2]. Зона возбуждения резонансной автомодуляции (РА) в пространстве параметров системы волоконный лазер–микрорезонатор имеет сложную структуру, состоящую из областей, соответствующих регулярным и устойчивым автоколебаниям с общей для микрорезонатора и волоконного лазера частотой  $F \approx f$ , а также участков, соответствующих движениям, близким к хаотическим. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования структуры зон возбуждения резонансной автомодуляции, закономерностей изменения режимов генерации ВЛ, а также особенностей изменения параметров автоколебаний в пределах отдельных областей зоны возбуждения, которые необходимо учитывать при разработке и оптимизации характеристик измерительных устройств на основе рассматриваемых систем. Установлены интересные прояв-

ления нелинейных свойств систем волоконный лазер–микрорезонаторные структуры, в которых реализованы условия для одновременного взаимодействия с излучением лазера двух и более микрорезонаторов.

В экспериментах применялись эрбиевые волоконные лазеры с линейной конфигурацией оптического резонатора, генерирующие на длине волны  $\lambda \cong 1540 \text{ nm}$  (рис. 1). В качестве зеркал резонатора лазера применялись кремниевые микрорезонаторы разных типов с диапазонами частот  $f$  и акустических добротностей  $Q$  основных мод упругих колебаний соответственно:  $f = 20\text{--}400 \text{ kHz}$ ,  $Q = 50\text{--}200$  (на воздухе). Активная среда волоконного лазера представляла собой участок световода (AB) с длиной  $L \approx 3 \text{ m}$ , легированного совместно ионами эрбия ( $\text{Er}^{+3}$ ) и иттербия-сенсibilизатора ( $\text{Yb}^{+3}$ ), накачка которой осуществлялась излучением полупроводникового лазера с длиной волны  $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ . Управление током инжекции  $I$  лазера накачки позволяло устанавливать среднюю выходную мощность излучения волоконного лазера  $W_{\text{av}}$  и относительный уровень накачки  $r = P/P_{\text{thr}}$  в пределах  $W_{\text{av}} = 0\text{--}30 \text{ mW}$ ;  $r = 0\text{--}4$ , где  $P_{\text{thr}}$  — пороговая мощ-

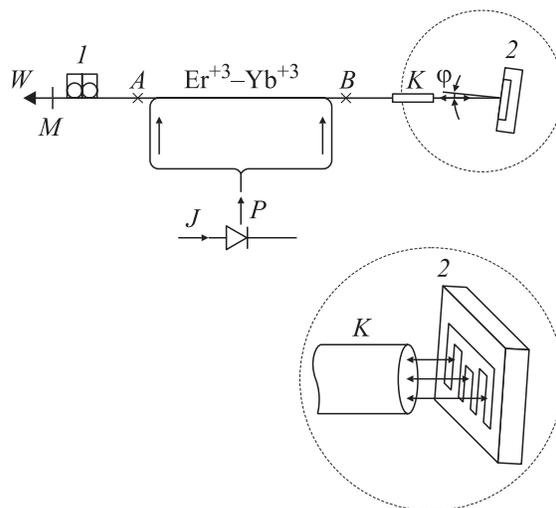
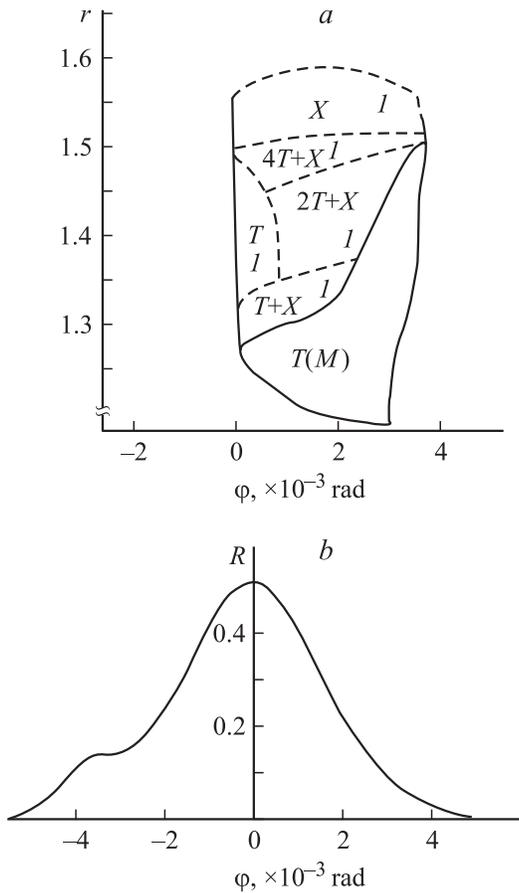


Рис. 1. Схема волоконного лазера с микрорезонаторным зеркалом: 1 — КП, 2 — МРС.



**Рис. 2.** Зона возбуждения автоколебаний (a); диаграмма направленности коллиматора (b) (I — возбуждение происходит жестким образом).

ность излучения накачки ВЛ. При этом релаксационные частоты лазера достигали значения  $f_{rel} = 0-170$  kHz.

Рассматриваемая система ВЛ–МРС обладает большим набором параметров, характеризующих 1) активную среду и резонатор волоконного лазера; 2) термооптические и термоупругие свойства МРС, резонансные частоты и добротности микрорезонаторов, их топологию; 3) линейные и угловые координаты, характеризующие взаимную ориентацию и положение оптического пучка лазера относительно микрорезонатора. В данной работе мы ограничимся исследованием систем волоконный лазер-микрорезонатор с оптической связью через автоколлиматор, проявляющих повышенную устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов [2]. При заданных характеристиках микрорезонатора и оптического резонатора ВЛ поведение рассматриваемых систем определяется главным образом значениями параметров  $(r, \varphi)$ , где  $\varphi$  — угол между осью коллимированного пучка и нормалью к поверхности микрорезонатора. Проекция сечений зон возбуждения резонансной автомодуляции на плоскость  $(r, \varphi)$ , как видно из рис. 2, состоят из ряда характерных областей, соответствующих различным проявлениям

нелинейной динамики: при малых уровнях накачки наблюдаются устойчивые автоколебания с основным периодом  $T = 1/f$  (область T), возбуждение которых происходит в „мягком“ режиме (М), за пределами указанной области возбуждение РА происходит „жестким“ образом (Ж), при этом наблюдаются режимы последовательного удвоения периода ( $2T$ ), завершающиеся хаотичным движением (х), выражающимся появлением в спектре интенсивности лазера большой „шумовой“ подставки, причем на фоне шума присутствуют дискретные линии, отвечающие основной частоте неустойчивых циклов, а также их ультра- и субгармоник. Наблюдаемая последовательность смены режимов генерации позволяет предположить, что потеря устойчивости регулярной автомодуляции лазера происходит по сценарию Фейгенбаума [3].

В пределах области синхронных автоколебаний (T) частота автомодуляции является по существу собственной частотой связанной системы осцилляторов, в роли которых выступают микрорезонатор и волоконный лазер, при этом ВЛ представляет собой модель существенно нелинейного осциллятора, характеризующегося спектром релаксационных колебаний. На основе скоростных уравнений волоконного лазера [4] и уравнения для линейного осциллятора, описывающего МРС, можно показать, что в приближении слабой связи осцилляторов и малых амплитуд колебаний микрорезонатора и интенсивности лазера частота автомодуляции  $F$  определяется как вещественный корень уравнения

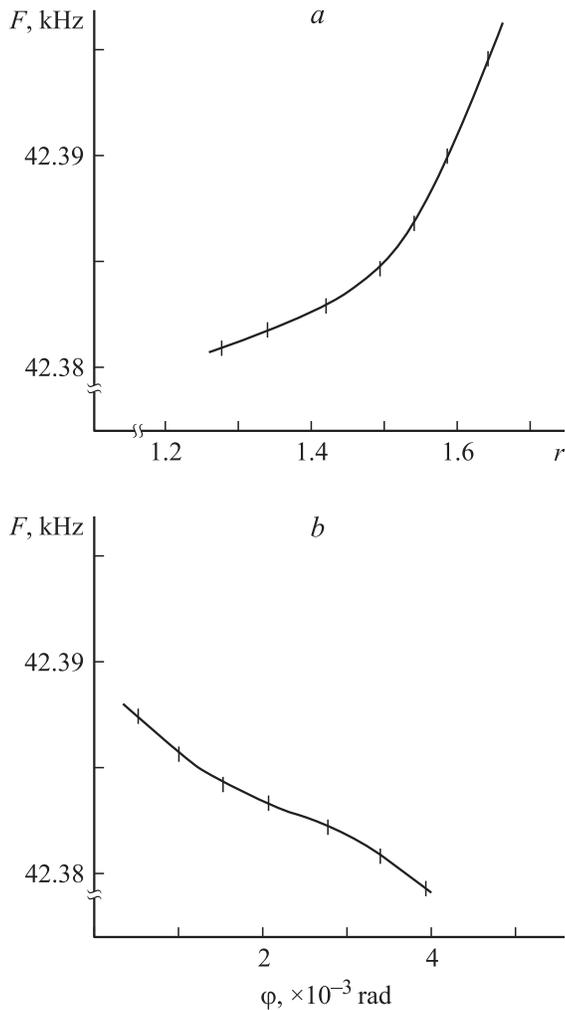
$$F^4 - F^2 \cdot (f^2 + f_{rel}^2 + f \cdot f_{rel}/Q \cdot Q_{rel}) + f^2 \cdot f_{rel}^2 + \gamma = 0, \quad (1)$$

где величины  $f_{rel}$ ,  $Q$  и  $\gamma$  зависят, в частности, от параметров  $(r, \varphi)$ ;  $Q_{rel}$  — добротность осциллятора, моделирующего релаксационные колебания ВЛ.

В уравнении (1) предполагается, что  $Q, Q_{rel} \gg 1$ , кроме того, коэффициент, характеризующий связь осцилляторов,  $\gamma/f^2 \cdot f_{rel}^2 \ll 1$ . В условиях резонанса ( $f_{rel} \approx f$ ) из выражения (1) следует, что  $F \approx f$ .

Экспериментальные зависимости  $F(r, \varphi, f)$  в пределах области (T), приведенные на рис. 3, показывают, что относительное изменение частоты автомодуляции  $\Delta F/f = [F - f]/f$  при заданных параметрах микрорезонатора не превышает  $10^{-4}$ , хотя вблизи границ области может достигать значений  $\Delta F/f \leq 5 \cdot 10^{-3}$ .

Примечательно, что при неизменных значениях параметров  $(r, \varphi)$  зависимость  $F(f)$  является практически линейной, при этом в диапазоне относительных изменений частоты микрорезонатора  $|\Delta f/f| \leq 5 \cdot 10^{-2}$  коэффициент нелинейности  $\delta = |\Delta F/\Delta f - 1|$ , как правило, не превышает 0.1%, что позволяет использовать рассматриваемый режим автоколебаний для построения прецизионных волоконно-оптических датчиков с частотным выходом. В отсутствие внешних воздействий на систему ВЛ–МРС относительный уровень среднеквадратических флуктуаций частоты автомодуляции  $(\langle \Delta F_{fl}^2 \rangle)^{1/2}/f$  существенно зависит от добротности МРС, причем с



**Рис. 3.** Зависимости частоты автоколебаний от уровня накачки лазера (*a*) и от угла наклона микрорезонатора (*b*).

ростом добротности уровень флуктуаций падает. Для микрорезонаторов, использованных в данной работе, ( $Q = 50-200$ ) относительные флуктуации составляли

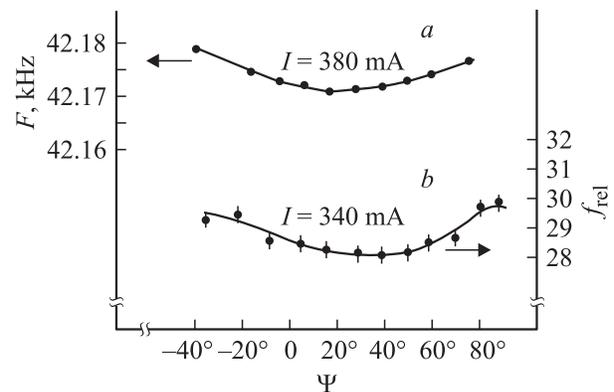
$$(\langle \Delta F_{fl} \rangle)^{1/2} / f = 5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5}.$$

Как известно [5], добротность микрорезонаторов, находящихся в нормальных условиях, определяется в основном рассеянием энергии колебаний в воздухе, которое существенно уменьшается при их вакуумировании. При давлении, не превышающем  $10^{-2}$  Па, добротность кремниевых микрорезонаторов разных типов составляет  $Q \approx 5 \cdot 10^3 - 10^5$ , в этом случае оценка относительных флуктуаций частоты автоколебаний в рассматриваемых системах не превышает  $5 \cdot 10^{-7}$ .

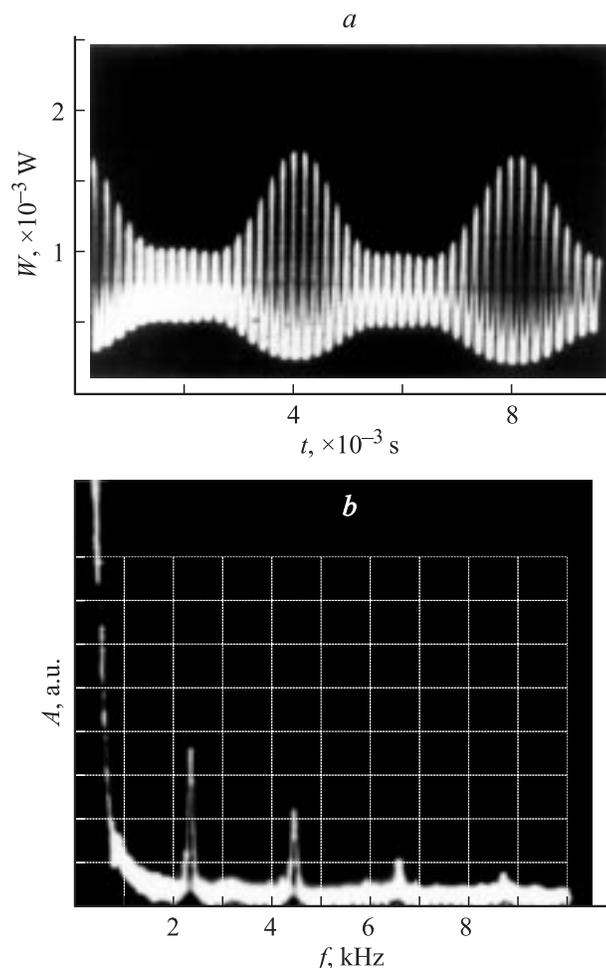
Как следует из уравнения (1), частота автоколебаний является функцией параметров, описывающих, в частности, релаксационные колебания волоконного лазера, которые определяются в основном характеристиками активной среды и оптического резонатора ВЛ. В связи

с тем, что частота является одной из наиболее точно измеряемых физических величин, указанную зависимость можно использовать для прецизионных измерений параметров активной среды и оптического резонатора ВЛ. Это подтверждают экспериментальные данные зависимости частоты автоколебаний в системе (кривая *a*) и релаксационных колебаний ВЛ (кривая *b*) от состояния поляризации излучения в резонаторе, приведенные на рис. 4. Изменение состояния поляризации излучения осуществлялось с помощью волоконного контроллера поляризации (КП), включенного в состав резонатора ВЛ, за счет вариации угла  $\Psi$  между осями двух фазовых пластинок в четверть волны, выполненных в виде волоконных петель. Поляризационные зависимости спектров автоколебаний  $F(\Psi)$  и релаксационных колебаний  $f_{rel}(\Psi)$  получены при уровнях накачки соответственно выше (кривая *a*) и ниже (кривая *b*) порога возбуждения автоколебаний, возникающих при значении тока инжекции  $I_{thr} = 350$  мА. Приведенные данные показывают, что имеется четкая корреляция между указанными функциями, причем относительные погрешности измерений поляризационных уходов частоты составляют  $\delta_1 = \langle \Delta F_{fl}^2 \rangle^{1/2} / (F_{max} - F_{min}) \approx 0.1$ , тогда как  $\delta_2 = \langle \Delta f_{rel, max}^2 \rangle^{1/2} / (f_{rel, max} - f_{rel, min}) \approx 0.3$ . Наблюдаемые поляризационные эффекты обусловлены, по-видимому, анизотропией именно активной среды, поскольку различие френелевских коэффициентов отражения микрорезонаторов незначительно и для рассматриваемых значений углов наклона зеркал ( $|\varphi| \leq 0.3^\circ$ ) не превышает  $3 \cdot 10^{-4}\%$ .

С точки зрения создания многоканальных измерительных систем значительный интерес представляют результаты экспериментов с использованием зеркал на основе планарных многоэлементных структур (рис. 1, *b*), когда в пределах сечения пучка лазера находится несколько микрорезонаторов. В этом случае лазерное излучение одновременно взаимодействует с двумя или более микрорезонаторами. При одинаковой эффективности оптического возбуждения и близких собственных частотах микрорезонаторов ( $f_1 \approx f_2$ ) в условиях резонансного



**Рис. 4.** Зависимости частоты автоколебаний (*a*) и релаксационных колебаний (*b*) от состояния поляризации.



**Рис. 5.** Осциллограмма интенсивности излучения волоконного лазера (*a*) и фурье-спектр интенсивности излучения лазера вблизи разностной частоты микрорезонаторов (*b*).

взаимодействия с лазером ( $f_{\text{rel}} \approx f_{1,2}$ ) можно реализовать автомодуляционный режим генерации ВЛ, при котором происходит одновременное самовозбуждение по крайней мере двух микрорезонаторов. На рис. 5 приведены осциллограмма и фурье-спектр интенсивности излучения ВЛ в области низких частот (разностных частот МРС), соответствующие рассматриваемому режиму генерации при  $f_1 \approx 57$  kHz и  $f_2 \approx 60$  kHz. Спектр модуляции интенсивности лазера содержит наряду с частотами ( $F_{1,2} \approx f_{1,2}$ ) также их разностную частоту  $\Delta F = f_1 - f_2$  (и ее гармоники), обусловленную нелинейными свойствами системы ВЛ–МРС<sub>1,2</sub>. Это явление открывает возможности создания микрорезонаторных волоконно-оптических датчиков, в которых реализуется разностная схема измерения, характеризующаяся повышенной устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов на измерительную систему.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках федеральной целевой программы „Интеграция“ (грант № Б0003).

## Список литературы

- [1] Bright Victor M., Comtois John H., Reid J. Robert, Sene Darren E. // IEICE TRANS. ELECTRON. 1997. Vol. E 80-c. N 2. P. 206–213.
- [2] Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Малков Я.В., Помапов В.Т. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 113–116.
- [3] Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, 1997. 496 с.
- [4] Barnard C., Myslinski P., Chrostowski et al. // IEEE J. Quantum Electron. 1994. Vol. 30. N 8. P. 1817.
- [5] Hok B., Gustafsson K. // Sensors and Actuators. 1985. Vol. 8. P. 235–243.