

07;12

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА С МИКРОРЕЗОНАТОРОМ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО

© В.Д.Бурков, Ф.А.Егоров, В.Т.Потапов

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию свойств лазеров с нелинейным зеркалом. Интерес объясняется широким разнообразием статических и динамических свойств подобных систем, таких как оптическая бистабильность, импульсный режим генерации и т. д. В качестве нелинейных отражателей рассматривались интерферометры Фабри-Перо (ИФП) [1], квантовые сверхрешеточные структуры [2], волоконно-оптические петли [3]. Характер нелинейности отражателей в значительной мере определяет особенности поведения систем. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию свойств эрбиевого волоконно-оптического лазера (ЭВОЛ) с новым типом нелинейного отражателя на основе ИФП, образованного зеркалом ЭВОЛ и внешним отражателем в виде микрорезонатора (МР). МР представляет собой оптически возбуждаемый механический осциллятор микронных размеров, при этом оптическое возбуждение осуществляется за счет эффекта фотоиндуцированных деформаций [4].

Особенность рассматриваемого нелинейного отражателя заключается в том, что уравнения, описывающие его нелинейность, качественно отличаются от рассмотренных выше [1-3]. Зависимость набега фазы δ , определяющей коэффициент отражения рассматриваемого нелинейного ИФП, можно описать моделью

$$m\ddot{\delta} + \gamma\dot{\delta} + k\delta = F = \kappa \cdot J, \quad (1)$$

где m , k , γ — соответственно эффективная масса, жидкость и коэффициент затухания МР, κ — коэффициент пропорциональности между фотоиндуцированной механической силой F и интенсивностью ЭВОЛ J . Уравнение (1) в отличие от рассмотренных ранее моделей [1-3] содержит составляющую со второй производной $\ddot{\delta}$.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. ЭВОЛ имеет следующие характеристики: длина волны излучения $\lambda = 1.535$ мкм, ширина линии $\Delta\lambda \leq 2$ нм, средняя выходная мощность излучения \bar{P} , в зависимости от мощности

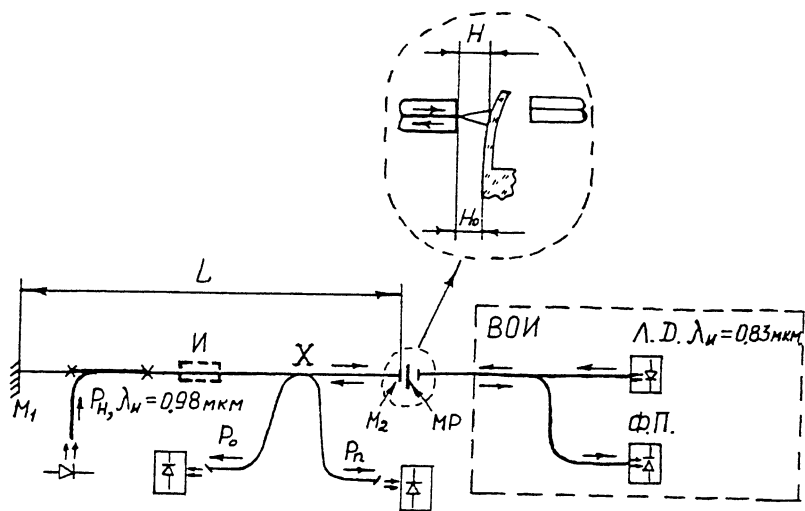


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

излучения накачки ($\lambda_H = 0.98$ мкм) P_H могла изменяться в пределах 0–40 мВт. Суммарная длина L оптического резонатора ЭВОЛ, состоящего из активного световода длиной 2.5 м и отрезка пассивного одномодового световода (длина волны отсечки $\lambda_c \approx 1.2$ мкм, апертура $NA \approx 0.17$, диаметр сердцевины $d_c \approx 6.5$ мкм), составляла 15 м. Коэффициенты отражения зеркал $M_{1,2}$ составляли соответственно $r_1 \approx 97\%$, $r_2 \approx 3.2\%$ (в качестве зеркала M_2 служила граница раздела световод–воздух). Симметричный X ответвитель позволял контролировать мощность излучения отраженного $P_0(t)$ и падающего $P_n(T)$ на МР. Микрорезонаторы представляли собой кремниевые структуры микронных размеров в виде мембраны, консоли, мостика, полученные методом анизотропного травления монокристаллического кремния [4]. Для повышения коэффициента отражения МР R на облучаемую сторону напылялась пленка металла (Al, Ti, Ni) толщиной 20–300 нм. Резонансные частоты МР находились в интервале 4–420 кГц, добротность Q механических колебаний МР составляла 30–200 в воздухе. Изменение взаимного расположения и ориентации МР относительно зеркала M_2 осуществлялось пьезопозиционером с субмикронной точностью. Измерение амплитуды колебаний или статических отклонений МР осуществлялось волоконно-оптическим интерферометром (ВОИ), измеряющим смещения свыше 1 нм в полосе частот 0–500 кГц. Мощность излучения ВОИ, па-

дающего на МР, не превышала 100 мкВт и практически не влияла на поведение системы.

Коэффициент оптической связи η волоконного резонатора ЭВОЛ с ИФП определяется соотношением [5] $\eta \approx (R/r_2)^{1/2}(1-r_2)(d_c/(d_c+2NA \cdot H))^2$, где H — расстояние между зеркалом M_2 и МР ($H \ll L$). Вариацией R , r_2 , H коэффициент η в эксперименте мог изменяться в пределах 0–3. Кроме того, существенного подавления обратной связи в волоконный резонатор ЭВОЛ вводился волоконно-оптический изолятор (И) с прямыми и обратными потерями соответственно 1.5 и 32 дБ.

Независимо от типа МР характер поведения рассматриваемых систем в основном был качественно подобен, поэтому в дальнейшем остановимся на свойствах ЭВОЛ, взаимодействующего с консольным МР с параметрами: геометрические размеры $530 \times 40 \times 6$ мкм; $f \approx 66$ кГц; $Q \approx 40$, коэффициент отражения зеркала МР в виде пленки Ni с толщиной ≈ 0.3 мкм составляла $R \approx 72\%$.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости средней мощности отраженного сигнала $\bar{P}_0(H_0)$ от расстоя-

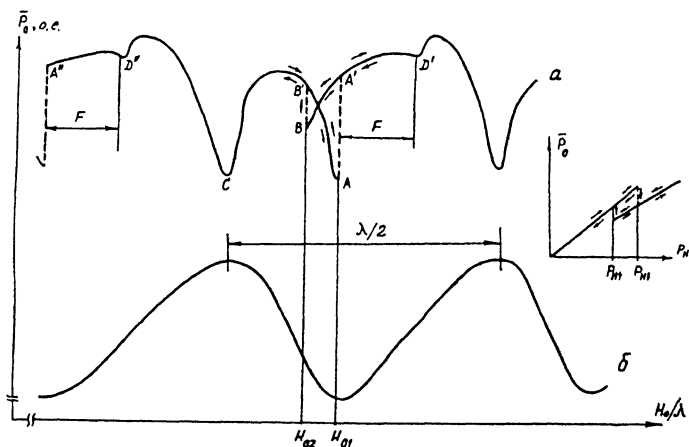


Рис. 2. Зависимости \bar{P} от расстояния H_0 и мощности накачки ЭВОЛ P_n .

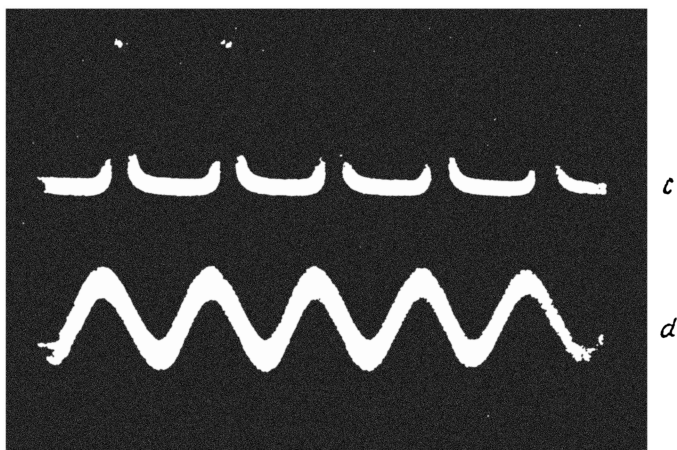


Рис. 3. Осциллограммы сигналов $P_n(t)$ (кривая c) и с выхода ВОИ (кривая d).

ния H_0 ($H_0 \neq H$) между зеркалом M_2 и основанием МР для систем: 1) $\eta \approx 0.3$ (кривая a); 2) с изолятором И в волоконном резонаторе ЭВОЛ (кривая b). Кривая b по существу представляет собой интерферограмму отражения низкодобротного линейного ИФП. Кривая a также периодична с периодом $\lambda/2$, однако имеет ряд особенностей. Во-первых, зависимость $\bar{P}_0(H_0)$ в пределах периода имеет дополнительные особые точки (A, B, C), во-вторых, $\bar{P}_0(H_0)$ имеет бистабильный характер; в зависимости от направления изменения H_0 при значениях H_{01}, H_{02} происходят скачки сигнала \bar{P}_0 . Бистабильное поведение $\bar{P}_0(H_0)$ имеет пороговый характер, при $\bar{P}_n < 3$ мВт переходы $A \rightarrow A', B' \rightarrow B$ совпадают и происходят плавно. В этом случае на участке кривой $A - A' \text{ tg } \alpha \rightarrow \infty$, таким образом, фотоиндуцированная деформация зеркала позволяет значительно повысить чувствительность подобных систем к микроперемещениям. Система обладает также оптической бистабильностью. При фиксированном значении H_0 вблизи области (H_{01}, H_{02}) зависимость $\bar{P}_0(P_n)$ имеет гистерезисный характер (рис. 2), в точках $P_{n\uparrow}, P_{n\downarrow}$ наблюдаются скачки сигнала \bar{P}_0 . При этом в системе ЭВОЛ с неподвижным зеркалом с оптическими параметрами, эквивалентными МР, зависимость $\bar{P}_0(P_n)$ является линейной. Контроль состояния МР с помощью ВОИ показывает, что в момент скачка сигнала \bar{P}_0 происходит резкое изменение H или динамики движения МР.

Временно-частотный анализ сигналов $P_0(t)$, $P_n(t)$ показывает их сложную зависимость от параметров системы H , P , характеристик МР и волоконного резонатора ЭВОЛ. Необходимо особо выделить следующее характерное свойство рассматриваемых систем: независимо от типа и параметров МР существуют области значений H_0 , P_n , в пределах которых в системе устанавливается автоколебательный режим с частотой колебаний F , практически совпадающей с резонансной частотой МР $f \approx F$. Области существования автоколебаний при заданном P_n , представленные на рис. 2 ($A'-D'$), ($A''-D''$), периодичны с периодом ИФП $\lambda/2$ и расположены на определенной (возрастающей) ветви интерферограммы $\bar{P}_0(H_0)$. Следует подчеркнуть, что автоколебания возбуждаются в том случае, когда частота релаксационных колебаний ЭВОЛ f_p (или ее гармоник), зависящих от P_n , близка к резонансной частоте МР $f \approx f_p$. В зависимости от параметров системы режим возбуждения автоколебаний может быть "мягким" или "жестким". При этом в зависимости от расположения зеркала M_2 относительно распределения амплитуды мод собственных колебаний МР, автоколебания могли возбуждаться на соответствующей моде колебаний МР со своими областями существования.

Важно отметить, что при внешних воздействиях на МР, изменяющих f (например, температура) соотношение $F \approx f$ сохраняется. Для рассматриваемой системы при $H_0 \approx \approx 50$ мкм пороговая мощность возникновения автоколебаний составляет $\bar{P}_{nn} \approx 400$ мкВт. При этом в схеме с оптическим изолятором И автоколебания не возбуждались, несмотря на то что \bar{P}_n могла значительно превышать \bar{P}_{nn} . При малых коэффициентах связи ($\eta \leq 10^{-3}$) автоколебания также не возбуждаются. Эти факты указывают на решающую роль обратной связи между ВОЛ и МР для существования автоколебаний, которые в рассматриваемой системе наблюдаются вплоть до $H_0 \approx 1$ мм. На рис. 3 приведены осциллограммы сигналов $P_n(t)$ и сигнала с выхода ВОИ, показывающие синхронность колебаний МР и выходного сигнала ЭВОЛ. Глубина модуляции сигналов $P_n(t)$ и $P_0(t)$ достигает 100%. Амплитуда автоколебаний МР не превышала $\lambda/4$ и, как правило, составляла 2–100 нм. В режиме автоколебаний для рассматриваемых систем характерно высокое отношение сигнал/шум для сигналов $P_n(t)$ и $P_0(t)$, достигающее в некоторых случаях 80–90 дБ.

Таким образом, в данной работе экспериментально показана возможность создания на основе предлагаемого нелинейного ИФП перестраиваемых по частоте волоконно-оптических автогенераторов.

Список литературы

- [1] *Shenping Li, Pons R., Yizhou Z.* // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. N 8. P. 1943-1950.
- [2] *Loh W.H., Atkinson D., Morkel P.R.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1993. V. 5. N 1. P. 35-38.
- [3] *Duling I.N., Chen C.I., Wail P.K.A.* et al. // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. N 1. P. 194-199.
- [4] *Culshaw B.* // Sensors and Actuators. 1995. A. 46-47. P. 463-469.
- [5] *Бакаев А.А., Чебуркин Н.В.* // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. № 7. С. 1302-1307.

Институт
радиотехники и электроники
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
17 июля 1996 г.