

07

Волоконный лазер с пассивным модулятором добротности на основе фотоиндуцированных резонансных колебаний световода

© Ф.А. Егоров, В.Т. Потапов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Московская обл., Фрязино
E-mail: egorov-fedor@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2010 г.

Исследованы автомодуляционные колебания интенсивности излучения волоконного лазера в режиме пассивной модуляции добротности при резонансных изгибных колебаниях участка световода — элемента лазерного резонатора. Показано, что на основе предложенной схемы возможно создание частотных волоконно-оптических датчиков физических величин.

Пассивная модуляция добротности резонатора является одним из эффективных методов управления параметрами излучения волоконных лазеров, широко применяемых в волоконно-оптических системах [1]. Такой режим может осуществляться разными способами, при этом особое внимание уделяется схемам в цельноволокном исполнении, которые наряду с конструктивно-технологическими преимуществами, обеспечивающими высокую эксплуатационную надежность лазеров, могут обладать также расширенными функциональными возможностями [2,3]. В настоящей работе экспериментально исследованы автомодуляционные режимы в эрбиевом волоконном лазере (EDFL) с пассивным модулятором добротности на основе волоконного световода с большим диаметром основной (фундаментальной) моды (LP_{01}), совершающим поперечные резонансные колебания под действием лазерного излучения. Принцип работы волоконного модулятора добротности основан на высокой чувствительности коэффициента прохождения для основной моды LP_{01} ступенчатого многомодового световода к деформациям изгиба. Рассматриваемая схема является развитием ранее исследованных систем EDFL-микрорезонатор [4,5], отличающаяся тем, что полностью

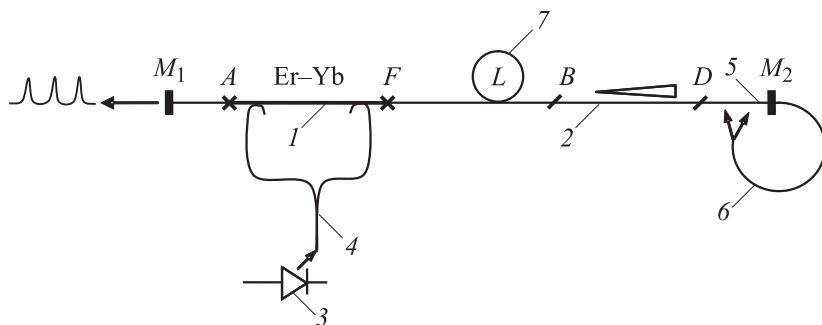


Рис. 1. Схема волоконного лазера с пассивным модулятором добротности: *I* — активный световод; *2* — модовый расширитель; *3* — полупроводниковый лазер накачки; *4* — волоконный разветвитель; *5* — колебательное звено; *6* — вспомогательный световод; *7* — дополнительный отрезок световода SMF-28.

базируется на волоконно-оптических элементах и технологиях. В условиях резонанса, когда собственная частота упругих колебаний световода f близка к частоте релаксационных колебаний EDFL $f_{rel} \approx f$, в волоконном лазере возникают устойчивые автомодуляционные колебания с частотой F , определяемой главным образом собственной частотой упругих колебаний световода ($F \approx f$). Возможность управления частотой упругих колебаний f и ее зависимость от внешних условий и воздействий открывают перспективы применения рассматриваемых лазеров в волоконно-оптических информационно-измерительных системах с частотным кодированием информации.

Схема волоконного лазера приведена на рис. 1. Основными элементами резонатора EDFL являются активный световод (AF) с двойной оболочкой, легированный эрбием и иттербием ($\text{Er}^{+3} - \text{Yb}^{+3}$); модовый расширитель в виде конусного световода (ВД); диэлектрические интерференционные полупрозрачные отражатели $M_{1,2}$, сформированные на торцевых поверхностях световодов, с коэффициентами отражения $R_1 \approx 92\%$, $R_2 \approx 50\%$ на линии генерации лазера $\lambda_s = 1576 \text{ nm}$. Накачка активного световода осуществляется встречными пучками излучения полупроводникового лазера $\lambda_p = 976 \text{ nm}$, направляемыми в AC с помощью разветвителей. Модовый расширитель в схеме EDFL служит для селективного возбуждения основной моды участка ступенчатого многомодового световода (DM₂), с диаметром моды d_m , и оптимального

согласования этой моды с модой стандартного одномодового световода SMF-28 с диаметром моды d_s . Оптимизация заключается в обеспечении достаточно малых потерь (например, не более 0.5 dB) при согласовании указанных мод, имеющих существенно разные диаметры ($d_s \ll d_m$), и в минимизации коэффициентов связи моды одномодового световода с другими направляемыми модами многомодового световода, которые могут возбуждаться в результате деформации. Коэффициенты связи мод на стыках разных световодов сложным образом зависят от геометрических размеров и профилей показателя преломления [6] и могут быть рассчитаны с помощью численных методов [7].

Схема и параметры элементов волоконного модулятора добротности приведены на рис. 2. Полная длина участка многомодового кварцевого световода с металлическим (медным) покрытием составляет $l \approx 35$ мм, при этом длина колебательного звена — участка, совершающего колебания, равна $l_c \approx 9$ мм. Концы этого участка заделаны в керамические капилляры (ферулы) и обработаны до оптического класса чистоты для нанесения полупрозрачного отражателя и обеспечения эффективной оптической связи с модовым расширителем. Многомодовый ступенчатый световод характеризуется следующими параметрами: числовая апертура $NA = 0.2$; диаметр сердцевины $d_c = 100 \mu\text{m}$, кварцевой оболочки $d_{cl} = 105 \mu\text{m}$; наружный диаметр $d = 125 \mu\text{m}$ (толщина медного покрытия $h \approx 10 \mu\text{m}$); характеристический параметр световода $V \approx 41$. В соответствии с приведенными данными диаметр основной моды (LP_{01}), определяемый по формуле $d_m = (2 \ln V)^{-1/2} d_c$ [6] составляет $d_m \approx 37 \mu\text{m}$, что достаточно близко к диаметру моды на выходе модового расширителя $42 \mu\text{m}$. Выбор световода с металлическим покрытием обусловлен необходимостью обеспечить, во-первых, высокую эффективность оптического возбуждения колебаний, осуществляемого главным образом фототермодеформационным механизмом, во-вторых, высокую добротность и частоту собственных колебаний при данной геометрии и условиях закрепления колебательного звена. Излучение EDFL к поверхности колебательного звена направляется с помощью вспомогательного многомодового световода ($100/125 \mu\text{m}$), при этом для увеличения поглощения света на боковую металлическую поверхность световода нанесен тонкий слой сажи.

С учетом коэффициента пропускания волоконного модулятора K эффективный коэффициент отражения зеркала M_2 составляет $R_{2eff} = K^2 R_2$, экспериментальная зависимость которого от величины центрального угла α (угла отклонения) приведена на рис. 2. Связь

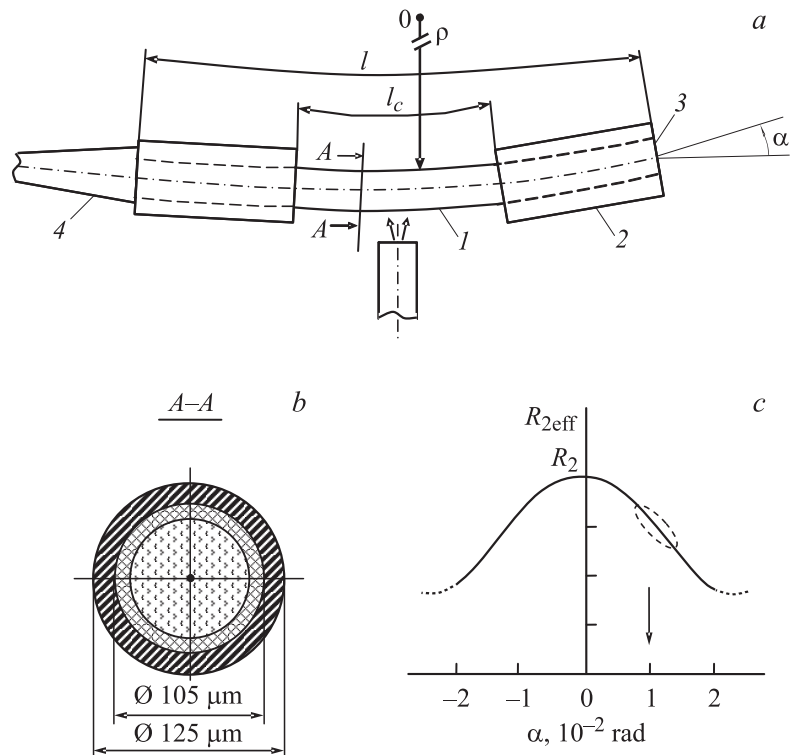


Рис. 2. *a* — схема и параметры волоконного модулятора потерь: 1 — колебательное звено; 2 — керамические капилляры (ферулы); 3 — интерференционный полупрозрачный отражатель; 4 — конусный световод (расширитель моды); *b* — схема сечения колебательного звена; *c* — зависимость эффективного значения коэффициента отражения от угла отклонения.

между радиусом кривизны ρ и углом отклонения имеет вид $\rho = l_c / \alpha$. Необходимая чувствительность коэффициента пропускания к малым колебаниям световода достигалась оптимизацией исходного радиуса кривизны ρ_0 , обеспечивающей достаточный наклон кривой $K(\rho)$, и допустимые оптические потери в схеме лазера, которые реализуются в окрестности рабочей точки, выделенной на рис. 2, *c*. Следует отметить, что при значительных изгибах ($|\alpha| \geq 2 \cdot 10^{-2}$ rad) зависимость $R_{2\text{eff}}(\alpha)$

является немонотонной, что, вероятно, связано с возрастающей ролью взаимодействия моды одномодового световода с неосновными модами колебательного звена (явление модовых шумов). Исследования частотной зависимости глубины модуляции коэффициента отражения $R_{2eff}(\Omega)$ в условиях вынужденных колебаний световода при акустическом и фототермическом возбуждении колебаний показывает, что собственная частота f_0 и добротность Q_0 нижней моды колебаний составляют $f_0 = 4.95$ kHz, $Q_0 = 270$. Источником возбуждающего оптического излучения служил полупроводниковый лазер ($\lambda = 980$ nm) с гармонически модулированной выходной мощностью. При частоте $f_D = 5.70$ kHz наблюдается дополнительный резонансный пик, обусловленный, вероятно, сложным характером движения центра масс колебательного звена по замкнутой кривой эллиптической формы, вследствие круглого сечения световода. Экспериментальное значение $f_0 = 4.95$ kHz находится в хорошем согласии с расчетной величиной $f_n \approx \frac{\pi}{8} \frac{d}{l_c} \left(\frac{E_{eff}}{\rho_{eff}} \right)^{1/2} \left(n + \frac{3}{2} \right)^2$ [8], где $n = 0, 1, 2, \dots$; E_{eff} и ρ_{eff} — эффективные значения модуля Юнга и плотности для двухслойного стержня-световода.

В режиме генерации ЭВЛ при выполнении условия резонанса $f_{rel} \approx f_{0,d}$ и превышении определенного порогового значения мощности излучения ($P \geq 4$ mW), падающего на поверхность колебательного звена, наблюдаются автомодуляционные колебания с частотой $F \approx f_{0,d}$. Важно подчеркнуть, что автоколебания возникают при освещении поверхности световода только с одной определенной стороны, что связано с необходимостью обеспечения положительной обратной связи в автоколебательной системе, реализуемой в данном случае при освещении именно внешней поверхности световода, более удаленной от центра кривизны изогнутого участка. Сравнительно низкая частота релаксационных колебаний EDFL одновременно с необходимым уровнем выходной мощности излучения $P \geq 4$ mW достигалась за счет увеличения длины резонатора лазера с помощью дополнительного отрезка световода SMF-28 длиной $L = 120$ m. Резонансная частота колебательного звена благодаря условию $\alpha \ll 1$ легко варьируется, например с помощью продольных деформаций, что открывает возможности для применения указанных элементов в качестве частотных преобразователей в волоконно-оптических датчиках физических величин. На рис. 3 приведены экспериментальная зависимость резонансной частоты колебательного звена от деформации растяжения $\varepsilon = \Delta l_c / l_c$, полученная в режиме вынужденных колебаний при оптическом возбуждении

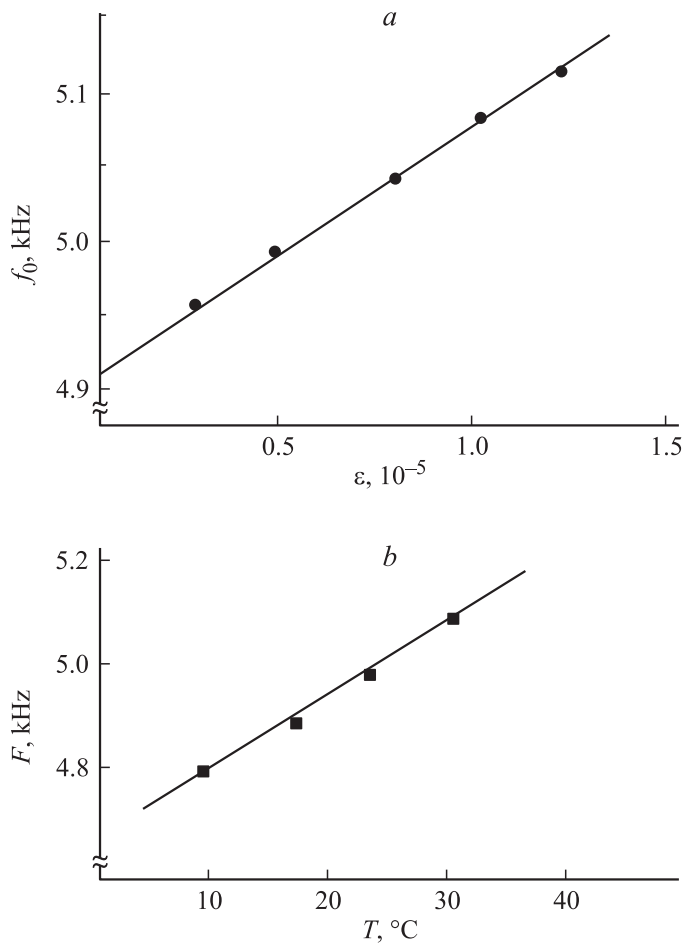


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты от деформаций растяжения $f_0(\varepsilon)$ (a); частоты автомодуляционных колебаний от температуры $F(T)$ (b).

$f_0(\varepsilon)$, и зависимость частоты автомодуляции $F(T)$ от температуры медной пластинки с закрепленным на ней модулятором добротности, полученная в схеме волоконного лазера. Рост температуры пластинки приводит к растяжению колебательного звена и соответственно к

увеличению частоты автомодуляции с температурным коэффициентом $k_T = \frac{1}{F} \frac{\Delta F}{\Delta T} \approx 0.004^\circ\text{C}$.

Модуляцию характеристик излучения в световодах, как известно [9], можно осуществлять с помощью разных видов деформаций. Макроизгиб в стандартных световодах является не самым эффективным способом модуляции, однако в данном случае, именно благодаря трансформации мод, существенно повышается эффективность модуляции потерь в волоконно-оптической схеме. Выбор указанного способа модуляции обуславливался необходимостью выполнения ряда условий: 1) обеспечить достаточные фотоиндуцированные деформации при сравнительно малых мощностях излучения EDFL ($P \leq 10 \text{ mW}$); 2) обеспечить спектральную широкополосность (1500–1600 nm) и неселективность к длине волны лазерного излучения в данном диапазоне); 3) простота конструкции и возможность легко управлять характеристиками волоконного пассивного модулятора добротности; — выполнение которых существенно упрощает схему EDFL и расширяет возможности для практического применения.

В световодах с металлическим покрытием фотоиндуцированные деформации могут создаваться также за счет поглощения излучения на внутренней поверхности металлического слоя на границе световод–металл. Для увеличения поглощения целесообразно применять световоды без кварцевой оболочки, с более простой структурой: сердцевина — металлическое покрытие, в том числе и полые металлические световоды. При этом фотоиндуцированные деформации могут создаваться, например, за счет асимметрии поперечного сечения металлического покрытия, приводящей к возникновению изгибающего момента вследствие разницы коэффициентов теплового расширения материалов, что легко реализуемо путем неравномерного нанесения слоя металла по периметру колебательного звена. Оценки показывают [10], что, например, в световоде с никелевым покрытием при диаметре кварцевой сердцевины $d_{co} = 50 \mu\text{m}$ на длине волны $\lambda = 1550 \text{ nm}$ половина мощности основной моды LP_{01} поглощается на длине участка световода $l \approx 7 \text{ mm}$. При этом отпадает необходимость во вспомогательном световоде, направляющем лазерное излучение на внешнюю боковую поверхность колебательного звена, и схема EDFL приобретает „минимальную“ конфигурацию. Очевидно, что могут использоваться также покрытия из различных диэлектрических или полупроводниковых материалов с необходимыми оптическими и термоупругими свойствами.

Таким образом, в волоконном лазере реализован режим пассивной модуляции добротности, основанный на фотоиндуцированных резонансных колебаниях световода, являющегося элементом лазерного резонатора. В перспективе возможно дальнейшее упрощение схемы путем совмещения функций колебательного звена и активного световода волоконного лазера, что, кроме того, может улучшить эффективность оптоакустического преобразования. Предложенная схема может служить основой при создании частотных датчиков линейных деформаций, являющихся волоконно-оптическими аналогами хорошо известных электромеханических струнных датчиков деформаций [11], отличающихся от последних отсутствием каких-либо электрических схем и цепей в зоне измерений, что, несомненно, расширит область из применения. Исследования физических основ функционирования, оптимизация конструкции пассивного волоконного модулятора является самостоятельной задачей, требующей отдельного изучения с учетом современных достижений в области микроструктурированных световодов, являющихся одновременно акустическими волноводами со сложной структурой [12]. В таких световодах могут возбуждаться фотоиндуцированные колебания различных структурных элементов световода в результате взаимодействий через механизмы нетепловой природы, которые практически неинерционные и обусловлены значительными поперечными градиентами в распределении поля моды микроструктурированного световода [13,14].

Авторы выражают благодарность ЗАО „Мониторинг-Центр“ за техническую помощь и финансовую поддержку в ходе выполнения работ.

Список литературы

- [1] *Труды* Российского семинара по волоконным лазерам. Новосибирск, 4–6 апреля 2007.
- [2] *Tzong-Yow Tzai, Yen-Cheng Fand, Zhi-Cheng Lee, Hong-Xi Tsao.* // Opt. Lett. 2009. V. 34. P. 2891–2893.
- [3] *Fotiadi A.A., Kurkov A.S., Razdobreev I.M.* // Proc. of Euro-CLEO. 2005. P. CJ2-3-MOW.
- [4] *Бурков В.Д., Егоров Ф.А., Потанов В.Т.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 1. С. 70–73.
- [5] *Егоров Ф.А., Никитов С.А., Потанов В.Т.* // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 6. С. 736–739.

- [6] *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
- [7] *Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А.* // Фотон-экспресс. 2004. № 6(38). С. 104–110.
- [8] *Бабаков И.М.* Теория колебаний. 3-е изд. М.: Наука, 1968. 560 с.
- [9] *Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В.* Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 152 с.
- [10] *Адамс М.* Введение в теорию оптических волноводов / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 512 с.
- [11] *Шайдуров Г.Я., Гондарев В.В., Мякотин Г.С., Булатов В.А., Волошин А.М.* // Датчики и системы. 2008. № 7. С. 7–10.
- [12] *Лисенков И.В., Никитов С.А., Попов Р.С., Чул Ку Ким.* // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 9. С. 1123–1134.
- [13] *Бирюков А.С., Дианов Е.М.* // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 9. С. 765–775.
- [14] *Povinelli M.L., Loncar Marko, Ibanescu Mihai, Elizabeth J. Smythe et al.* // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 3042–3044.