

09.5

## Сигналы межмодового волоконного интерферометра, вызванные модуляцией частоты лазера

© О.И. Котов, И.Е. Чапало, А.В. Петров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
E-mail: kotov@rphf.spbstu.ru

Поступило в Редакцию 11 апреля 2015 г.

Исследованы сигналы межмодового волоконного интерферометра, возникающие при модуляции частоты излучения лазера. Для разных типов волоконных световодов теоретически и экспериментально изучены зависимости амплитуд и спектров сигналов межмодового волоконного интерферометра от величины девиации частоты лазера. Установлено, что чувствительность межмодового волоконного интерферометра к изменениям частоты лазера существенно зависит от профиля показателя преломления сердцевины. Минимальная чувствительность соответствует градиентным ( $\alpha \approx 2$ ) многомодовым световодам. Ступенчатые волоконные световоды ( $\alpha = \infty$ ) чувствительнее к изменениям частоты лазера более чем в 100 раз.

В последние годы наблюдается интенсивный рост внимания к многомодовым волоконно-оптическим системам, в которых проявляется эффект межмодовой интерференции. Разрабатываются разнообразные волоконные датчики физических величин (т. н. SMS-структуры) [1–4], продемонстрированы высокоразрешающие оптические спектрометры [5], исследуются модовые шумы в многомодовых линиях связи, возникающие вследствие спектральных флуктуаций VCSEL-лазеров [6–8].

Изменения частоты лазера являются одной из причин возникновения сигналов межмодового волоконного интерферометра (МВИ). Этот эффект может быть как полезным (в датчиках на его основе), так и паразитным (как дополнительный источник шума). Ранее он изучался [9–12] в рамках исследований корреляционных характеристик выходной спекл-картины МВИ, а также частотных свойств модовых шумов. Однако ряд вопросов, таких как зависимость характеристик сигналов МВИ (их амплитуды и спектра) от изменений частоты лазера

и профиля показателя преломления сердцевин световода, не были рассмотрены в достаточной мере.

В данной работе теоретически и экспериментально исследованы амплитуды и спектры выходных сигналов МВИ, вызванных изменением частоты лазера, для волокон различных длины и профилей показателя преломления сердцевин. Рассматривается случай возбуждения многомодового волоконного световода высококогерентным полупроводниковым лазером с перестройкой частоты излучения. Часть выходного излучения световода регистрируется фотоприемником. Сигнал фотоприемника обрабатывается для получения требуемых характеристик МВИ. Считаем, что изменения выходной спекл-картины являются следствием исключительно изменений частоты лазера, которая принудительно меняется посредством управления током накачки, а все остальные элементы оптической схемы не подвержены внешним воздействиям.

Для теоретического анализа применяется представление выходного поля многомодового световода в виде суммы модовых компонент

$$E(r, \varphi) = \sum_{k=1}^M A_k E_k(r, \varphi) \exp[-i(\beta_k L + \Phi_k)], \quad (1)$$

где  $A_k$ ,  $E_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\Phi_k$  — коэффициент возбуждения, модовая функция, постоянная распространения, сдвиг фазы  $k$ -й моды соответственно;  $L$  — длина волокна;  $M$  — число мод, распространяющихся в световоде. Модовые фазы  $\Phi_k$  считаются постоянными, но случайными величинами.

Частотная зависимость сигналов МВИ определяется главным образом зависимостью постоянной распространения от оптической частоты  $\beta_k(\nu)$  [13]

$$\beta_k = \frac{2\pi\nu n}{c} \sqrt{1 - 2\Delta \left( \frac{k}{M(\nu, \alpha)} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}}}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света,  $k$  — номер модовой группы,  $n$  — коэффициент преломления на оси сердцевин волокна,  $\alpha$  — показатель степенного профиля сердцевин,  $M(\nu, \alpha)$  — полное число модовых групп в данном световоде, определяемое выражениями [13]

$$M(\nu, \alpha) = \sqrt{\frac{\alpha V^2}{2(\alpha + 2)}}, \quad V = \frac{2\pi a \nu n \sqrt{2\Delta}}{c}, \quad \Delta = (n^2 - n_0^2)/2n^2, \quad (3)$$

где  $V$  — нормированная частота,  $M < M(\nu, \alpha)$ ,  $n_0$  — коэффициент преломления оболочки. Диаметр сердцевин и относительная разность

показателей преломления были равными во всех случаях:  $2a = 50 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0.01$ .

Изменения оптической частоты задавались гармонической функцией  $\nu(t) = \nu_0 + \delta\nu \sin \Omega t$ . Частота модуляции ( $\Omega/2\pi$ ) выбиралась равной 1 Hz в расчетах и экспериментах. Амплитуда частотной модуляции (девиация)  $\delta\nu$  варьировалась от 1 MHz до 10 GHz.

Используя приведенные выражения, были рассчитаны зависимости сигнала фотоприемника на выходе многомодового световода от изменений оптической частоты  $U(\delta\nu)$ . Основное внимание было уделено двум характеристикам сигналов МВИ:

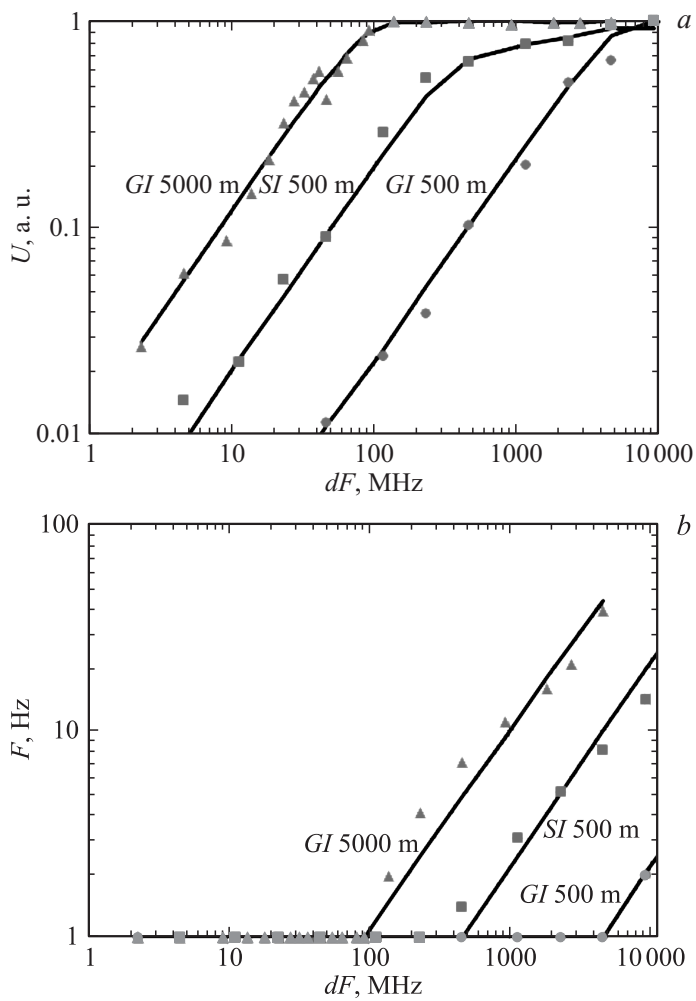
— амплитудной характеристике, определяемой как зависимость амплитуды сигналов фотоприемника от амплитуды колебаний оптической частоты  $\delta\nu$ ;

— спектральной характеристике, определяемой как зависимость ширины спектра детектированных сигналов от  $\delta\nu$ .

Примеры результатов расчета амплитудных и спектральных характеристик сигналов МВИ представлены на рис. 1 сплошными линиями.

Также были выполнены расчеты амплитудного отклика МВИ на флуктуации оптической частоты лазера в зависимости от параметра профиля показателя преломления  $\alpha$ . Амплитудный отклик МВИ рассматривался в виде нормированной среднеквадратичной амплитуды сигналов МВИ  $\delta = \frac{\sqrt{\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2}}{\langle U \rangle}$  при фиксированной среднеквадратичной амплитуде частотных флуктуаций лазера  $\delta\nu_{RMS} = 100 \text{ MHz}$  для волокна длиной 1 km, диаметром  $50 \mu\text{m}$  (рис. 2). Как видно на рис. 2, малые отклонения параметра  $\alpha$  от параболического профиля вызывают значительное возрастание чувствительности МВИ к флуктуациям оптической частоты лазера.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Применялся одночастотный полупроводниковый DFB-лазер QPHOTONICS QDFBLD-1300-10 (3) (длина волны 1300 nm, пороговый ток 9 mA, рабочий ток 35 mA, мощность 6 mW), управляемый контроллером лазерных диодов THORLABS ITC 502 (2). Перестройка частоты осуществлялась методом прямой модуляции по току посредством генератора электрических сигналов (1). Величина девиации частоты оценивалась по амплитуде модулирующего сигнала, подаваемого на соответствующий вход контроллера лазера, при известном коэффициенте преобразования ток–частота (550 MHz/mA), полученном при помощи калибровки системы частотной модуляции лазера разбалансированным волоконным интерферометром Маха–Цендера. Нижняя



**Рис. 1.** Амплитудные (а), спектральные (b) характеристики сигналов МВИ, а также пример изображения обеих характеристик на одном графике (с). Сплошные линии — результаты модельных расчетов, точки — результаты экспериментов. Параметры световодов в расчетах: *GI 5000 m* —  $\alpha = 2.06$ ,  $M = 9$  мод; *SI 500 m* —  $\alpha = 200$ ,  $M = 3$  моды; *GI 500 m* —  $\alpha = 1.989$ ,  $M = 12$  мод; для всех световодов  $2a = 50 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0.01$ .

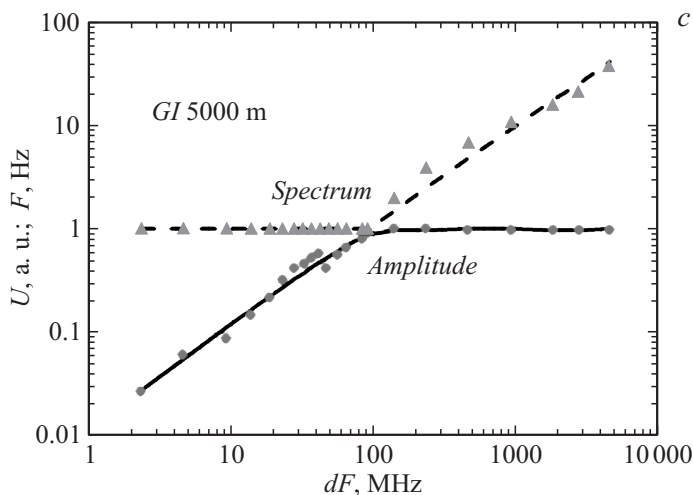
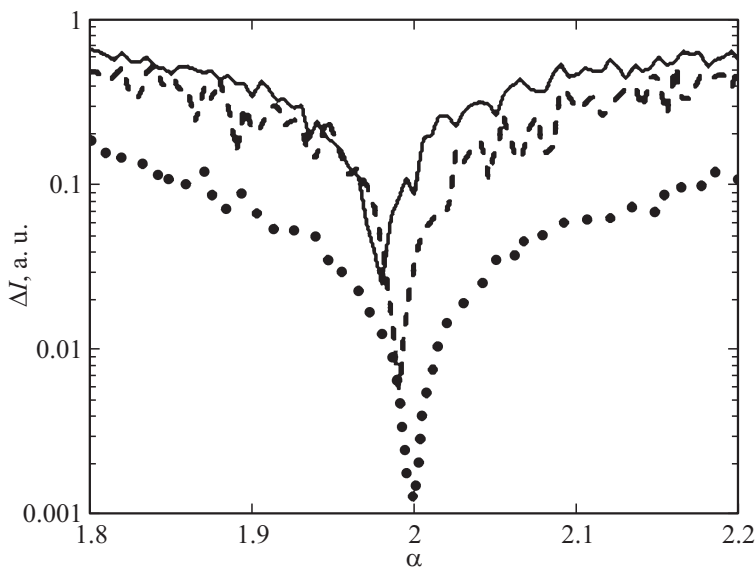


Рис. 1 (продолжение).

граница девиации определялась в основном отношением сигнал—шум в оптоэлектронной схеме приема и обработки сигнала. С другой стороны, наблюдение сигнала при малой девиации частоты (1 MHz) означает, что среднеквадратичная флуктуация частоты используемого лазера не превышает этой величины в полосе регистрации сигналов (10 kHz). Для возбуждения в многомодовых световодах большого количества мод использовался волоконный скремблер (4) (модовый смеситель) типа ModCon производства Arden Photonics. Фотоприемник (6) регистрировал часть спекл-картины выходного излучения световода, осуществляя пространственную фильтрацию, необходимую для преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности. Для повышения контраста перед фотоприемником был установлен линейный поляризатор [9]. Сигнал фотоприемника оцифровывался (7) и обрабатывался в компьютере для получения необходимых характеристик.

Амплитудные и спектральные характеристики МВИ были получены при многократной регистрации сигналов для каждого значения амплитуды девиации частоты лазера с последующим усреднением полученных данных. Устранение компоненты сигнала, вызванной прямой модуляцией интенсивности излучения лазера, достигалось вычитанием из амплитудной характеристики зависимости типа  $Y = bX$ , в которой

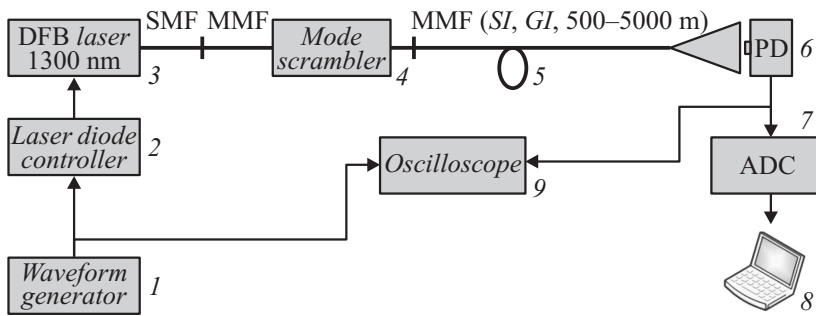


**Рис. 2.** Зависимости амплитудного отклика МВИ на флуктуации оптической частоты от профильного параметра  $\alpha$ . Параметры волокна:  $L = 1$  km,  $2a = 50$   $\mu$ m,  $\Delta = 0.01$ . Верхняя сплошная кривая — случай возбуждения в волокне 13 мод, средняя кривая — 7 мод, нижняя — 2 моды. Среднеквадратичная флуктуация частоты для всех случаев  $\sigma_0 = 100$  MHz.

коэффициент наклона  $b$  оценивался из полученных спектральных характеристик при больших девиациях частоты ( $\sim 10$  GHz).

Амплитудные характеристики, представленные на рис. 1 (показаны точками) в нормированном на максимальное значение виде, фактически отражают контраст сигналов МВИ вследствие модуляции частоты лазера. Так, например, для градиентного световода длиной 500 m величина контраста 1% соответствует девиации частоты  $\sim 40$  MHz.

На основе амплитудных характеристик целесообразно рассмотреть параметр чувствительности многомодового световода к изменениям частоты лазера:  $S = (\Delta U / U_{\max}) / (\Delta \nu L) [\% / (\text{MHz} \cdot \text{km})]$ , где  $L$  — длина волокна. Изменения сигнала  $\Delta U$  от сдвига частоты на  $\Delta \nu$  выбирали на начальном участке амплитудной характеристики и нормировали



**Рис. 3.** Структурная схема установки для исследования частотных характеристик сигналов МВИ. 1 — генератор переменных сигналов, 2 — блок питания и управления лазера, 3 — одночастотный полупроводниковый лазер, 4 — модовый скремблер (расширитель модового состава), 5 — исследуемый многомодовый световод, 6 — фотодиодный приемник, 7 — аналого-цифровой преобразователь, 8 — устройство обработки сигналов (компьютер).

на максимальное значение  $U_{max}$ . Оцененный по экспериментальным данным параметр составил величину:  $S_{GI} \sim 0.02\% / (\text{MHz} \cdot \text{km})$  для градиентных параболических световодов и  $S_{SI} \sim 2\% / (\text{MHz} \cdot \text{km})$  для „ступенчатых“ волокон.

Спектральные характеристики получали посредством преобразования Фурье. На рис. 1 ширина спектра сигнала представлена в GHz и при частоте модуляции 1 Hz соответствовала числу гармоник на периоде сигнала модуляции, наблюдавшихся на осциллограмме.

Точки перегиба на амплитудной и спектральной характеристиках почти совпадают в логарифмическом масштабе и разделяют области с малым и большим индексами модуляции разности фаз мод ( $< \pi$  и  $> \pi$ ) (рис. 1). Координаты этих точек определяют вид „совокупной“ характеристики световода (рис. 1, c) и зависят от параметров световода (длины, профиля показателя преломления  $\alpha$ , параметра  $\Delta$  и числа возбужденных мод). С учетом результатов работы [11] можно предположить, что точки перегиба определяются полосой пропускания световода при данном модовом составе. Однако это утверждение требует, по мнению авторов, отдельного рассмотрения. Влияние числа мод на работу МВИ также представлено в нашей предыдущей работе [14].

Нетрудно видеть, что зависимости на рис. 2 во многом аналогичны зависимостям коэффициентов межмодовой дисперсии в многомодовых световодах от параметра профиля  $\alpha$ . Несмотря на то что эти функции отображают разные физические процессы, они имеют одинаковый характер — резкое уменьшение в районе оптимального профиля показателя преломления. При этом их минимальные значения соответствуют одним и тем же величинам параметра  $\alpha$ . Это объясняется тем, что в их основе лежит один и тот же механизм — выравнивание групповых скоростей мод в градиентном волокне. Отсюда следует, что критерием выбора многомодового световода среди доступных коммерческих вариантов с минимальной чувствительностью к сдвигам частоты лазера является его полоса пропускания (MHz · km). Чем больше полоса на рабочей длине волны, тем менее чувствителен световод к флуктуациям частоты.

## Список литературы

- [1] *Rodríguez A.J., Baldovino-Pantaleón O., Domínguez Cruz R.F. et al. // Sensors. 2014. V. 14. P. 17 817–17 828.*
- [2] *Luan P., Tong Z., Cao Y., Zhang W. // Opt. Eng. 2015. V. 54(3). P. 036 104–(1–5).*
- [3] *Li C., Ning T., Wen X., Li J. et al. // Opt. Commun. 2015. V. 343. P. 6–9.*
- [4] *Kumar M., Kumar A., Tripathi S.M. // Opt. Commun. 2014. V. 312. P. 222–226.*
- [5] *Redding B., Popoff S. M., Cao H. // Opt. Express. 2013. V. 21. N 5. P. 6584–6600.*
- [6] *Matsuura M., Furukawa R., Matsumoto Y., Inoue A., Koike Y. // Opt. Express. 2014. V. 22. N 6. P. 6562–6568.*
- [7] *Castro J., Pimpinella R., Kose B., Lane B. // J. Lightwave Technol. 2013. V. 31. N 15. P. 2629–2638.*
- [8] *Alcaro G., Visani D., Tarlazzi L., Faccini P., Tartarini G. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2012. V. 60(1). P. 185–194.*
- [9] *Rawson E.G., Goodman J., Norton R.E. // J. Opt. Soc. Am. 1980. V. 70. N 8. P. 968–976.*
- [10] *Ohtsubo J. // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 19. P. 4235–4238.*
- [11] *Moslehi B., Goodman J.W., Rawson E.G. // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 7. P. 995–999.*
- [12] *Ohtsubo J., Kouroggi M. // J. Lightwave Technol. 1989. V. 7. N 9. P. 1300–1307.*
- [13] *Gasulla I., Capmany J. // Opt. Express. 2006. V. 14. N 20. P. 9051–9070.*
- [14] *Котов О.И., Чапало И.Е., Медведев А.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 31–36.*