

УДК 535.8

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

О. Н. Егорова¹, М. С. Астапович¹, М. Е. Белкин², С. Л. Семенов¹

Волоконно-оптическая линия задержки впервые изготовлена на основе многосердцевинного оптического волокна. За счет последовательного прохождения оптического импульса по всем сердцевинам получена временная задержка оптического сигнала 45.0 мкс при длине световода всего 1300 м. Использование семисердцевинного оптического волокна позволяет в семь раз сократить длину используемого волокна по сравнению с односердцевинным оптическим волокном, что перспективно для создания линий, рассчитанных на большую задержку сигнала.

Ключевые слова: многосердцевинное оптическое волокно, групповая задержка, волоконно-оптические линии задержки.

Волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ) применяются для ряда задач радиофотоники [1, 2], связанных с обработкой радиочастотного сигнала [3, 4]. Принцип обработки радиосигнала оптическими методами заключается в том, что обрабатываемый радиочастотный сигнал преобразуется в аналоговый оптический сигнал путем модуляции высококогерентного оптического излучения. Для некоторых задач, связанных с обработкой такого радиооптического сигнала, необходимы линии задержки, обеспечивающие длительную задержку сигнала на время, например, 100 мкс и более.

Для обеспечения длительной задержки аналогового сигнала в настоящее время используются электронные и волоконно-оптические линии задержки. В ВОЛЗ задержка модулированного оптического сигнала достигается за счет прохождения оптического волокна определенной длины. Конструкция ВОЛЗ существенно проще, чем у электронных аналогов, а также они обладают устойчивостью к электромагнитным помехам и

¹ Научный центр волоконной оптики РАН, 119333 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Московский технологический университет (МИРЭА), 119454 Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78; e-mail: mastak@fo.gpi.ru.

малыми шумами. Однако ВОЛЗ, необходимые для получения длительной задержки сигнала, существенно уступают электронным аналогам при использовании в условиях ограниченного пространства, например, для бортовых применений. Это связано со значительной массой и габаритами волоконных устройств, связанными с необходимостью использования значительной длины оптического волокна.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности сокращения длины оптического волокна в линии задержки за счет использования многосердцевинного оптического волокна (МОВ) [5]. При последовательном прохождении оптического сигнала по сердцевинам МОВ требуемая задержка может быть обеспечена на длине волокна, существенно меньшей, чем длина односердцевинного волокна [6].

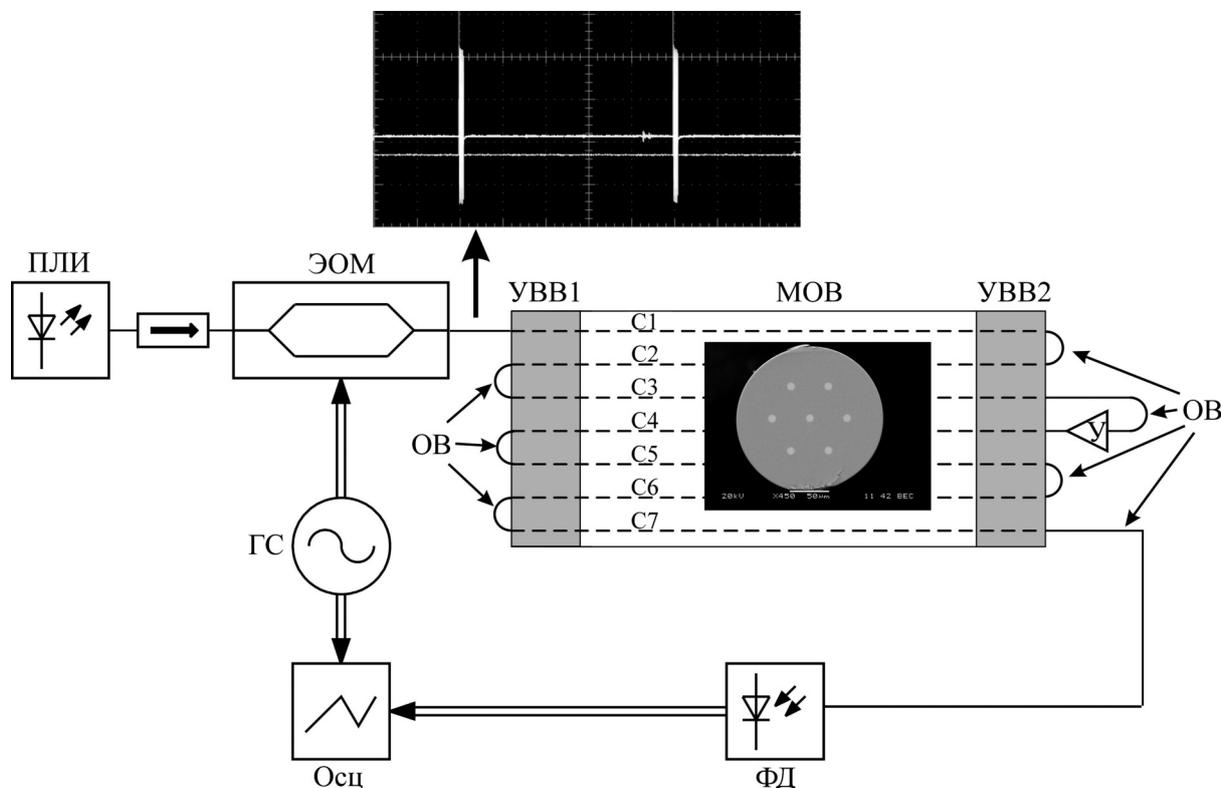


Рис. 1: Схема волоконно-оптической линии задержки на многосердцевинном оптическом волокне (МОВ). На вставках – фотография торца МОВ и осциллограмма сигнала после электрооптического модулятора (ЭОМ). Пояснения в тексте.

Основным элементом исследуемой ВОЛЗ, схема которой представлена на рис. 1, является МОВ с пристыкованными к нему с обеих сторон устройствами ввода–вывода. Устройство ввода–вывода осуществляет ввод и вывод сигнала из каждой сердцевины

МОВ в отдельные односердцевинные оптические волокна. Для создания ВОЛЗ использовалось 1300 м семисердцевинного оптического волокна, изготовленного в НЦВО РАН. Фотография поперечного сечения семисердцевинного оптического волокна, полученная на электронном микроскопе, показана на вставке на рис. 1. Все сердцевинки данного волокна имели одинаковые параметры. Разница показателей преломления сердцевин и оболочки составляла 0.0055. Расстояние между центрами соседних сердцевин – 47 мкм, диаметр сердцевин – 8.2 мкм. Длина волны отсечки первой высшей моды в каждой из сердцевин находилась в диапазоне 1340–1380 нм. Оптические потери в сердцевинах приведены в табл. 1. В центральной сердцевине оптические потери были существенно ниже, чем в боковых. Возрастание потерь в боковых сердцевинах связано, по-видимому, с вытеканием излучения в защитную полимерную оболочку, имевшую показатель преломления выше, чем у кварцевого стекла.

Т а б л и ц а 1

Оптические потери в ВОЛЗ

Номер сердцевинки	1 (центр.)	2	3	4	5	6	7
Потери в сердцевине (1.55 мкм), дБ/км	0.8	2.1	2.2	2.4	2.2	2.3	2.3
Потери в УВВ1, дБ	0.8	1.6	1.3	1.5	1.4	1.8	1.7
Потери в УВВ2, дБ	0.9	0.6	0.6	1.1	1.6	0.6	0.5
Суммарные потери, дБ	2.5	4.3	4.1	5.0	5.2	4.7	4.5

Устройства ввода–вывода были изготовлены для данного МОВ по технологии, описанной в [8]. В табл. 1 представлены величины оптических потерь в месте стыковки каждой из сердцевин многосердцевинного оптического волокна с устройствами ввода–вывода УВВ1 и УВВ2 (рис. 1). Оптические потери на стыковке каждой из сердцевин составили менее 2 дБ. Также в табл. 1 представлены суммарные потери в каждом канале, включающие потери в 1300 м семисердцевинного оптического волокна и его стыковках с устройствами ввода–вывода.

Для тестирования ВОЛЗ использовался аналоговый сигнал. Для его моделирования было использовано излучение узкополосного полупроводникового лазерного источника (ПЛИ) на длине волны 1.5592 мкм (рис. 1), которое подавалось на электрооптический модулятор Маха–Цандера (ЭОМ). С помощью ЭОМ узкополосное оптическое излучение модулировалось последовательностью импульсов длительностью 1 мкс и частотой несущей 100 МГц, получаемой от генератора сигналов (ГС). Время между импульсами

составляло 50 мкс. Осциллограмма сигнала после ЭОМ показана на вставке на рис. 1. Мощность сигнала на выходе ЭОМ составляла 9.5 дБм.

Сигнал после ЭОМ подавался по односердцевинному оптическому волокну в устройство ввода–вывода УВВ1, далее поступал в первую сердцевину С1 многосердцевинного оптического волокна МОВ. Пройдя по ней, оптический сигнал с помощью устройства ввода–вывода УВВ2 поступал в короткий отрезок односердцевинного волокна ОВ, а затем во вторую сердцевину многосердцевинного световода С2. Пройдя по ней, сигнал аналогичным образом подавался в третью С3, затем четвертую С4 и т. д. сердцевины световода. После прохождения всех семи сердцевины сигнал подавался на фотодетектор ФД, электрический сигнал с выхода которого подавался на осциллограф. Для измерения задержки сигнала синхронизирующий импульс от генератора сигналов ГС также подавался на осциллограф Осц. Поскольку значительная величина оптических потерь в сердцевинах МОВ и на стыковках МОВ с устройствами ввода–вывода приводила к существенному ослаблению сигнала, в схему был включен эрбиевый волоконный усилитель У с усилением 13 дБ.

Полученное значение временной задержки при прохождении сигнала по всем семи сердцевинам МОВ, измеренное по переднему фронту импульса, составило 45.0 мкс. Полученное значение оптической задержки соответствует расчетным значениям, полученным по формуле $\tau = 7(L \cdot n_g)/c$, где $n_g = 1.468$ – групповой показатель преломления стандартного телекоммуникационного волокна, $L = 1300$ м – длина световода. Расчетное значение групповой задержки после прохождения семи сердцевины составляет 44.52 мкс. Разница расчетной и измеренной оптической задержек между каналами обусловлена дополнительной длиной эрбиевого усилителя и отрезков односердцевинных волокон ОВ.

Таким образом, на основе семисердцевинного оптического волокна впервые была изготовлена линия задержки оптического сигнала. Благодаря тому, что сигнал последовательно проходит по всем семи сердцевинам многосердцевинного оптического волокна, удалось получить временную задержку оптического сигнала 45.0 мкс при длине световода всего 1300 м. Таким образом, волоконно-оптические линии задержки на основе многосердцевинного оптического волокна перспективны для получения длительных времен задержек, поскольку позволяют многократно сократить длину оптического волокна, а, следовательно, массу и габариты этих устройств.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI60715X0138).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Seeds, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **50**, 877 (2002).
- [2] J. Capmany and D. Novak, Nature photonics **1**, 319 (2007).
- [3] J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor, and S. Sales, J. of Lightwave Technology **23**(2), 702 (2005).
- [4] R. A. Minasian, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **54**(2), 832 (2006).
- [5] S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, et al., in *Proceedings of Optical Fiber Communication, Conf. Washington, D.C., 1979*. OSA Technical Digest Series (OSA, 1979), WB1. doi: 10.1364/OFS.1979.WB1.
- [6] О. Н. Егорова, М. С. Астапович, М. Е. Белкин, С. Л. Семенов, заявка на Патент РФ № RU 2016124251 от 20.06.2016.
- [7] B. Li, Z. Feng, M. Tang, et al., Optics Express **23**(9), 10997 (2015).

Поступила в редакцию 14 сентября 2016 г.

В переработанном виде 30 ноября 2016 г.