

07;12

Когерентный волоконно-оптический рефлектометр с полупроводниковым лазером на длину волны $\lambda = 810 \text{ nm}$

© В.Т. Потапов, А.М. Мамедов, Б.Г. Игнатов, Т.В. Потапов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.
E-mail: v_potapov38@mail.com

Поступило в Редакцию 21 февраля 2011 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований когерентного волоконно-оптического рефлектометра, в котором в качестве источника излучения использован одномодовый полупроводниковый лазер, излучающий на длине волны $\lambda = 810 \text{ nm}$. Показана возможность создания распределенных волоконно-оптических датчиков динамических воздействий на основе этого рефлектометра с длиной волоконного контура до 3 км.

К настоящему времени известно достаточно большое число публикаций, посвященных распределенным волоконно-оптическим датчикам (ВОД) физических величин на основе когерентных рефлектометров [1–5]. Результаты этих работ позволяют сделать вывод, что эти датчики практически прошли этапы лабораторных исследований и начинают применяться на практике в различных системах охранной сигнализации и мониторинга состояния объектов.

На данном этапе разработок в основном все распределенные ВОД строятся на основе когерентных рефлектометров, работающих на длине волны $\lambda = 1550 \text{ nm}$, так как в этом диапазоне существуют эффективные волоконно-оптические усилители и имеется в наличии вся элементная база, что позволяет создавать протяженные системы распределенных ВОД длиной до 50 км и более [6]. Однако стоимость таких систем достаточно велика, и в значительной степени определяется ценой эрбиевых волоконных усилителей. В то же время существует целый ряд задач, для которых требуются распределенные ВОД с длиной волоконного контура в несколько километров (до 3 км). В этом случае возможно использовать когерентные рефлектометры, работающие в

диапазоне длин волн $\lambda = 850$ nm, стоимость которых может быть существенно снижена. В данной работе приводятся результаты исследования когерентного рефлектометра с полупроводниковым лазером на $\lambda = 810$ nm и возможностей создания на его основе распределенных ВОД динамических смещений и вибраций.

Известно, что при ширине импульса света в одномодовом оптическом волокне ~ 20 m (длительность импульса порядка 100 ns) величина мощности обратного рэлеевского рассеяния на длине волны $\lambda = 1550$ nm на 62.4 dB меньше величины вводимой в волокно мощности, а пороговая чувствительность фотоприемных устройств на $\lambda = 1550$ nm на основе соединений InGaAs/InP составляет $\approx 2 \cdot 10^{-13}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ при общей полосе частот фотоприемника ≈ 50 MHz. В этом случае при вводимой в волокно мощности ~ 1 W обеспечивается возможность регистрации обратного рэлеевского рассеяния от дальнего конца волоконной линии длиной $\cong 50$ km при потерях в волокне $\cong 0.25$ dB/km. На длине волны $\lambda = 800$ –820 nm мощность обратного рэлеевского рассеяния примерно на порядок превышает аналогичную величину мощности на $\lambda = 1550$ nm, а чувствительность фотоприемных устройств с кремниевым лавинным фотодиодом может достигать $\cong 2 \cdot 10^{-14}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$. С учетом того, что потери мощности в одномодовом оптическом волокне в диапазоне длин волн $\lambda = 800$ –820 nm на порядок превышают потери на $\lambda = 1550$ nm, простые оценки показывают, что в диапазоне длин волн $\lambda \cong 800$ –820 nm когерентный рефлектометр способен регистрировать сигнал обратного рэлеевского рассеяния от дальнего конца линии длиной $\cong 3$ km при вводимой в волокно мощности излучения порядка 10 mW. Если к тому же учесть, что при длине волоконной линии до 5 km возможно организовать накопление сигнала от 10–20 рефлектограмм, то очевидно, что на основе когерентного волоконного рефлектометра на $\lambda = 810$ nm можно реализовать распределенные ВОД с длиной линии до 5 km, чувствительность и пространственное разрешение которых будут сравнимы с аналогичными параметрами распределенных ВОД на $\lambda = 1550$ nm.

С целью проверки этих выводов был разработан и создан лабораторный макет когерентного волоконно-оптического рефлектометра на длину волны $\lambda = 810$ nm. Схема когерентного рефлектометра приведена на рис. 1. Исходя из поставленной выше задачи, при длине волоконной линии до 2 km полупроводниковый лазер на $\lambda = 810$ nm должен

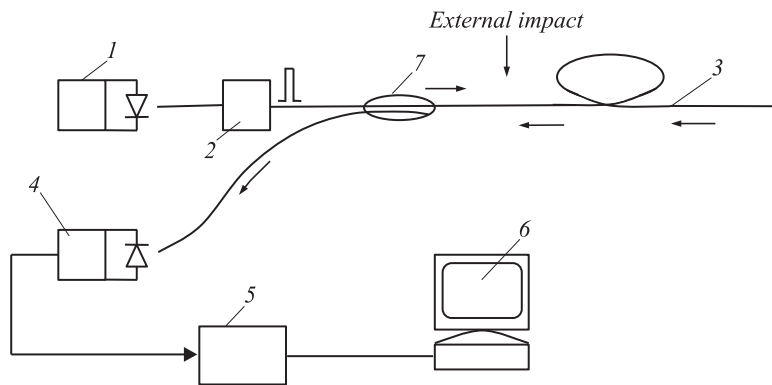


Рис. 1. Схема когерентного рефлектометра: 1 — полупроводниковый лазер со схемой стабилизации; 2 — акустооптический модулятор; 3 — волоконно-оптическая линия; 4 — фотоприемник; 5 — АЦП; 6 — ПЭВМ; 7 — волоконно-оптический разветвитель.

удовлетворять следующим требованиям: величина вводимой в волокно мощности излучения должна составлять не менее 1 mW при длине когерентности не менее 100 m.

Этим требованиям удовлетворяет одночастотный полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью разработки НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха, который используется в данной работе. Ширина линии излучения лазера составляла не более 500 kHz, что соответствовало длине когерентности $l \cong 400$ m. Мощность излучения, вводимая в оптическое волокно, составляла $\cong 1$ mW. Лазер работал в непрерывном режиме, мощность и частота излучения лазера стабилизировались. Импульсная модуляция осуществлялась с помощью акустооптического модулятора. Сигнал обратного рэлеевского рассеяния регистрировался фотоприемником, изготовленным на основе кремниевого лавинного фотодиода и имел чувствительность $\cong 4 \cdot 10^{-14}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$. В качестве тестируемой линии использовался отрезок одномодового оптического волокна длиной 2 km с длиной волны отсечки $\lambda = 780$ nm. Длительность зондирующего импульса на входе волоконной линии задавалась акустооптическим модулятором и составляла ≈ 100 ns, что соответствовало пространственному разрешению рефлектометра, рав-

ному ≈ 20 м. Сигнал с фотоприемника поступал на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), данные с которого обрабатывались далее на компьютере. Частота оцифровки АЦП составляла 50 МГц, а длительность сеанса измерения — 1.3 мс, таким образом, за один сеанс измерения АЦП можно было получить 64 последовательных рефлектограммы.

Внешнее механическое воздействие на оптическое волокно, приводящее к фазовой модуляции световой волны, в лабораторном макете осуществлялось с помощью цельноволокнистого фазового модулятора, представляющего собой пьезокерамическое кольцо диаметром $\cong 30$ мм, на которое было намотано 5 витков оптического волокна, и установленного на расстоянии 500 м от входного торца волоконной линии. Подавая на обкладки фазового модулятора пилообразное напряжение, можно было обеспечить деформации растяжения–сжатия волокна по пилообразному закону. Известно [2,3], что сигнал когерентного рефлектометра в каждый момент времени представляет собой сигнал двухлучевого интерферометра, а „точечная“ фазовая модуляция вызывает изменение малой части рефлектограммы в точке воздействия. Таким образом, на линейном участке „пилы“ растяжение волокна по линейному закону приводит к синусоидальному изменению сигнала когерентного рефлектометра в точке воздействия. Следовательно, наличие модулятора приводит к синусоидальному закону изменения во времени сигнала когерентного рефлектометра, соответствующего „точке“ воздействия.

Частота пилообразного сигнала была равна 200 Нз, полная амплитуда напряжения составляла 60 В. Эти параметры были подобраны таким образом, чтобы за время сеанса измерения АЦП укладывался, как минимум, один полный период синусоидального сигнала рефлектометра в „точке“ воздействия.

На рис. 2 показаны сигнал фазовой модуляции и соответствующее ему изменение рефлектограммы в месте расположения фазового модулятора на волоконной линии. Как видно из рис. 2, на линейном участке пилообразного воздействия сигнал рефлектометра изменяется во времени синусоидально, что подтверждает его интерференционный характер.

На рис. 3 представлены усредненные рефлектограммы, полученные на рефлектометре при воздействии на волокно и в его отсутствии.

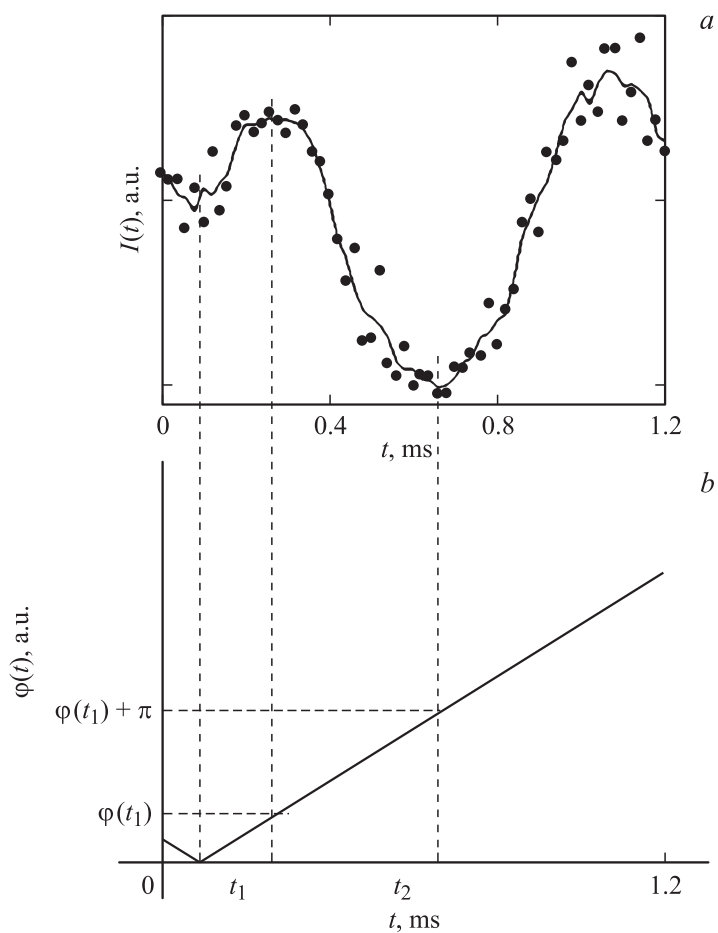


Рис. 2. Сигнал фазовой модуляции и соответствующее ему изменение рефлектограммы. *a* — пилообразный сигнал, приводящий к фазовой модуляции света в волокне; *b* — изменение рефлектограммы во времени при фазовой модуляции. Точки — результаты измерений. Сплошная линия — результат сглаживания экспериментальных данных по методу простого скользящего усреднения, с окном усреднения, равным 3.

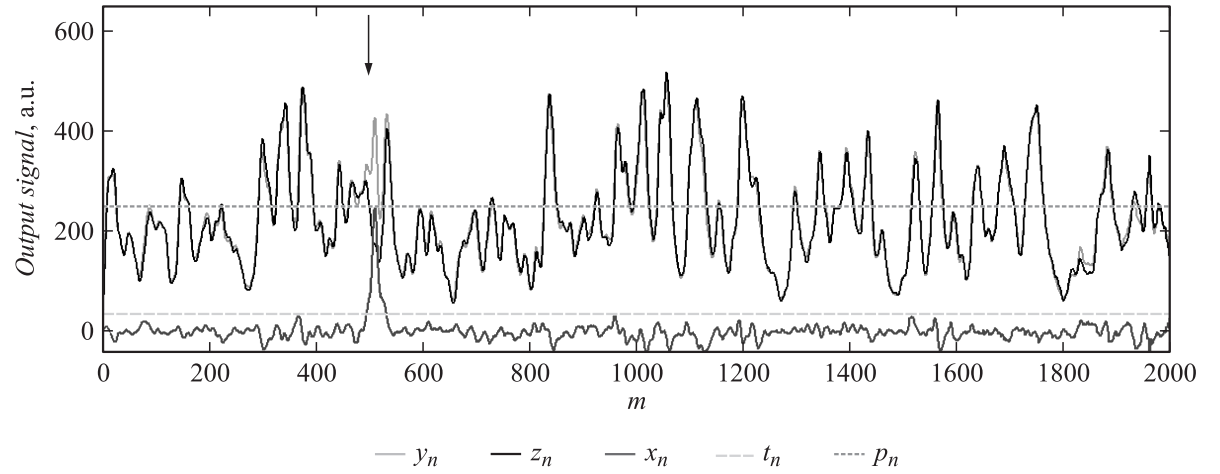


Рис. 3. Две последовательные рефлектограммы, полученные на рефлектометре (вверху), и их разностный сигнал (нижняя кривая) в точке воздействия на волокно на расстоянии $\cong 500$ m от начального конца волокна.

Время усреднения рефлектограмм составляло $\cong 0.2$ ms. Из этого рисунка видно, что рефлектограммы отличаются одна от другой только на участке фазовой модуляции волокна, т.е. в точке воздействия на волокно, в остальном они идентичны. Здесь же показан разностный сигнал 2 рефлектограмм, который представляет собой острый пик на участке рефлектограммы, соответствующем месту воздействия. Полуширина этого пика равняется примерно 20 m, что совпадает с величиной пространственного разрешения рефлектометра.

Пороговая чувствительность когерентного рефлектометра к изменению оптической фазы составила примерно 0.2 rad, что соответствует относительному удлинению отрезка волокна длиной 20 m (пространственное разрешение рефлектометра), равному $\approx 1.3 \cdot 10^{-9}$.

Таким образом, на основе когерентного волоконно-оптического рефлектометра с полупроводниковым лазером с выходной мощностью $\cong 10$ mW в диапазоне длин волн $\lambda = 800-820$ nm могут быть созданы распределенные волоконно-оптические датчики с длиной волоконного контура до 3 km, обладающие высокой пороговой чувствительностью и достаточно высоким пространственным разрешением. При этом такие системы не требуют применения дорогостоящих эрбиевых волоконных усилителей, вследствие чего их стоимость может быть значительно снижена по сравнению с известными системами [4].

Список литературы

- [1] *Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V., Juskaitis R.* // Opt. Lett. 1994. V. 19. N 3. P. 225–227.
- [2] *Потапов В.Т., Трещиков В.Т., Трещиков С.В., Шаталин С.В.* // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 2. С. 1505–1510.
- [3] *Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J.* // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 5600–5604.
- [4] *Juarez J.C., Maier E.W., Choi K.N., Taylor H.F.* // J. Lightwave Technol. 2005. V. 23. N 6. P. 2081–2086.
- [5] *Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т.* // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. С. 963–965.
- [6] *Jihong Geng, Christine Spiegelberg, Shibin Jiang* // Proc. SPIE. 2005. N 5855. P. 80–83.