

Демонстрация частотной модуляции оптических сигналов с высоким параметром девиации частоты

А.В.Шамрай, А.С.Козлов, И.В.Ильичев, М.П.Петров

Разработан и изготовлен новый тип интегрально-оптического модулятора для частотного кодирования оптических сигналов. Принцип работы модулятора основан на оригинальной технологии электрического управления брэгговской решеткой. Экспериментально продемонстрирована частотная модуляция оптического сигнала с девиацией частоты 25 ГГц. С использованием данного типа модулятора была реализована передача ASCII-кода по оптическому волокну.

Ключевые слова: оптические телекоммуникации, волоконно-оптические системы связи, форматы модуляции, интегральная оптика, электрооптические модуляторы.

1. Введение

Постоянное увеличение скорости передачи в системах оптических телекоммуникаций сопровождается ростом искажений цифровых сигналов, в частности вызванных дисперсией и нелинейными оптическими эффектами. Известно, что форматы кодирования оптических сигналов, использующие частотную модуляцию, обладают повышенной устойчивостью к искажениям сигнала и самой низкой восприимчивостью к нелинейным эффектам в оптическом волокне [1]. Хотя частотная модуляция широко используется в системах беспроводной связи и радиосвязи, исследования частотной модуляции оптических сигналов (FSK, Frequency Shift Keying), или модуляции длины волны света, находятся на начальном этапе развития, далеко от практических применений. Это объясняется, прежде всего, отсутствием необходимой элементной базы для осуществления быстрой частотной модуляции оптических сигналов.

Дело в том, что для передачи двоичного частотно-модулированного сигнала с минимальной вероятностью ошибки (BER) девиация частоты Δf должна соответствовать критерию «минимального сдвига» [2],

$$\Delta f = \pm \frac{kB}{2}, \quad (1)$$

где k – целое число, а B – ширина спектральной полосы двоичного сигнала. Таким образом, девиация частоты напрямую зависит от ширины спектральной полосы двоичного сигнала (битовой частоты). В настоящее время идет активная работа по увеличению скорости передачи данных в волоконных системах связи и переходу на стандарт 40 Гбит/с [3]. Высокая битовая частота задает высокие требования к девиации частоты FSK-сигнала. Для обеспечения минимальной частотной модуляции на битовой частоте 40 Гбит/с девиация частоты должна составлять более 20 ГГц.

В настоящее время для частотной модуляции оптических сигналов обычно используют прямую модуляцию тока накачки полупроводникового лазера [4]. При относительно небольших изменениях частоты (~ 1 ГГц) изменения амплитуды незначительны от бита к биту. Однако реализация форматов с высокой девиацией частоты (свыше 10 ГГц) неизбежно приведет к изменению амплитуды сигнала. Паразитная амплитудная модуляция вызывает появление шумов при детектировании частотно-модулированного сигнала и снижает устойчивость к нелинейным оптическим эффектам и дисперсии. Поэтому данный вид модуляторов плохо подходит для реализации частотной модуляции с высокой битовой частотой (более 10 Гбит/с). Таким образом, для практической реализации новых форматов модуляции оптических сигналов с использованием частотного кодирования необходимо разработать частотные модуляторы, обеспечивающие одновременно высокую битовую частоту и высокую девиацию частоты без паразитной амплитудной модуляции.

2. Макет для демонстрации передачи частотно-модулированных оптических сигналов

Для создания частотного модулятора оптических сигналов мы предлагаем использовать оригинальную технологию электрооптического управления спектральной характеристикой брэгговских решеток [5]. Брэгговская решетка работает как узкополосный оптический фильтр (спектрально-селективное зеркало), отражая свет в узком спектральном диапазоне с центральной длиной волны, соответствующей точному выполнению условия Брэгга. Если решетка сформирована в электрооптическом материале, то центральная длина волны брэгговского отражения может быть изменена электрооптически путем приложения внешнего электрического поля и изменения среднего показателя преломления. Детальные исследования электрооптического управления брэгговскими решетками [5] показали возможность реализации перестройки центральной длины отражения брэгговской решетки в диапазоне шириной ~ 0.6 нм в области телекоммуникационных длин волн (1500–1600 нм), что соответствует девиации центральной частоты 75 ГГц. Использование электрооптического эффекта потенциально обеспечивает

А.В.Шамрай, А.С.Козлов, И.В.Ильичев, М.П.Петров. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: achamrai@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 26 октября 2007 г.

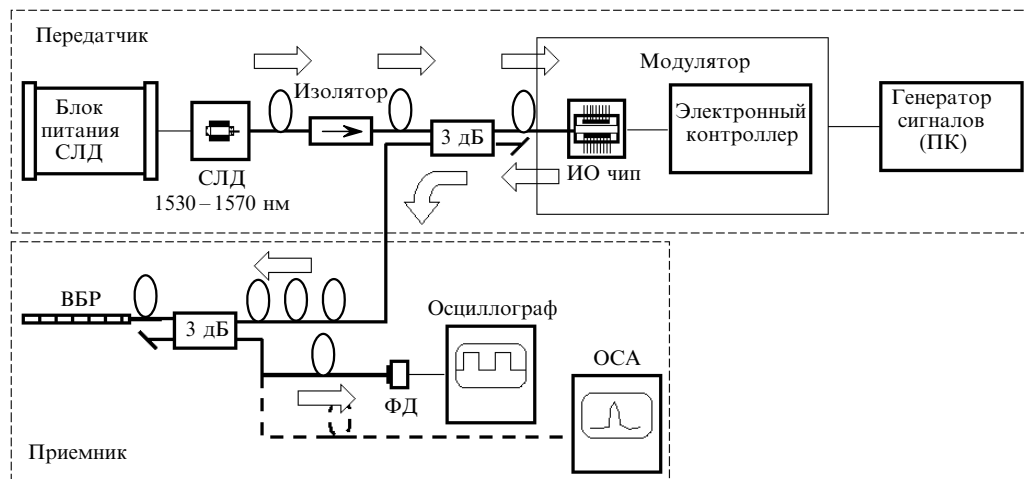


Рис.1. Схема экспериментальной установки для демонстрации передачи частотно-модулированного оптического сигнала: СЛД – суперлюминесцентный диод; ВБР – волоконная брэгговская решетка; ФД – фотоприемник; ОСА – оптический спектроанализатор.

высокие частоты управления центральной длиной волны (до 10 ГГц и выше), что делает данную технологию весьма перспективной для реализации частотной модуляции в оптических системах телекоммуникаций.

Нами был разработан и построен макет-демонстратор канала связи для передачи частотно-модулированного оптического сигнала (рис.1). Демонстратор состоит из двух базовых блоков: передатчика и приемника.

Ключевым элементом макета является интегрально-оптический модулятор на основе управляемой брэгговской решетки. На схеме модулятор изображен в виде двух отдельных блоков: электронного контроллера и интегрально-оптического (ИО) чипа (управляемой брэгговской решетки). Электронный контроллер был специально разработан для генерации сигналов управления модулятором и имеет связь с персональным компьютером через стандартный интерфейс RS 232. Для осуществления пользовательского интерфейса была разработана специальная программная оболочка, работающая в OS Windows. В качестве интегрально-оптического чипа использовалась голографическая брэгговская решетка, сформированная в канальном оптическом волноводе на подложке LiNbO_3 . Было изготовлено несколько образцов решеток с коэффициентом отражения более 95 % и полосой пропускания $\text{FWHM} = 0.2$ нм. Оригинальная система электродов обеспечивала возможность гибкого управления спектральной характеристикой брэгговской решетки. Готовый образец стыковался с одномодовым оптическим волокном.

В качестве источника оптического излучения использовался суперлюминесцентный светодиод (СЛД) с электронным драйвером. Ширина спектра излучения СЛД составляла 40 нм (1530–1570 нм) при интегральной выходной оптической мощности 5 мВт. Ввод и вывод оптического излучения, отраженного от модулятора, осуществлялся через волоконный ответвитель с коэффициентом деления 3 дБ (50 : 50).

Для дискриминации частотно-модулированного двоичного оптического сигнала в приемнике использовалась волоконная брэгговская решетка (ВБР), изготовленная по заказу в Научном центре волоконной оптики РАН. Волоконная решетка на склоне своей спектральной характеристики отражения осуществляла преобразование модуляции длины волны (частотной модуляции) света в мо-

дуляцию интенсивности, которая регистрировалась на фотоприемнике (ФД) и наблюдалась при помощи осциллографа.

3. Экспериментальные результаты

Для экспериментальной демонстрации передачи частотно-модулированного сигнала нами использовался информационный сигнал стандартного 8-битного ASCII-кода, передаваемый с персонального компьютера на электронный блок управления интегрально-оптическим модулятором через интерфейс RS 232. В экспериментах использовался сигнал со скоростью передачи 19200 бит/с. Скорость передачи была ограничена доступной электроникой. Потенциально интегрально-оптический модулятор, основанный на электрооптическом управлении брэгговскими решетками, может обеспечивать частоты модуляции до 10 ГГц и выше.

Настройка параметра девиации частоты Δf частотно-модулированного оптического сигнала осуществлялась путем установки на электронном контроллере модулятора значений прикладываемого к брэгговской решетке управляющего электрического поля, которые соответствуют состоянию логического нуля ($E_0 = -11.3$ В/мкм) и логической единицы ($E_1 = 6.5$ В/мкм). Измерение оптического спектра сигнала на выходе передатчика для двух состояний частотно-модулированного двоичного сигнала показало, что смещение центральной длины волны для данных значений управляющего электрического поля составляет 0.2 нм. Это эквивалентно девиации частоты 25 ГГц при пересчете в шкалу частот (рис.2). Изменение мощности светового излучения на выходе передатчика было менее 10 %.

Таким образом, экспериментально показано, что новый тип модулятора обеспечивает высокую частотную девиацию, необходимую для передачи сигналов с высокой битовой скоростью (более 10 Гбит/с), при этом амплитудная модуляция сигнала незначительна, чего нельзя получить на полупроводниковых лазерах при прямой модуляции тока накачки.

На рис.3 показаны осциллограммы с выхода фотоприемника после дискриминации частотно-модулированных сигналов на брэгговской решетке. Были осуществлены передача случайной последовательности символов

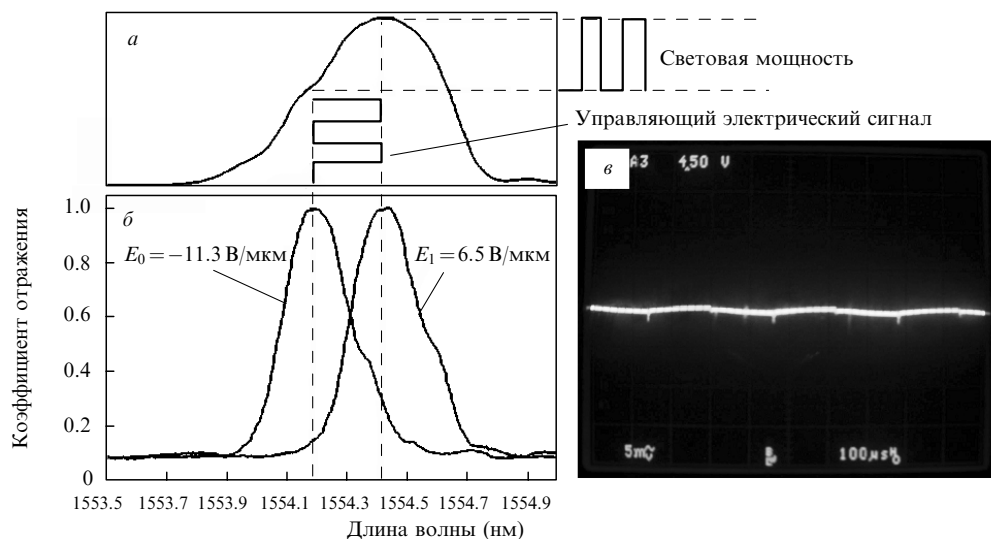


Рис.2. Схема, поясняющая дискриминацию частотно-модулированного оптического сигнала на волоконной брэгговской решетке: экспериментально измеренная спектральная характеристика коэффициента отражения волоконной брэгговской решетки (а), оптические спектры частотно-модулированного сигнала на выходе интегрально-оптического модулятора для состояний 0 и 1 передаваемого двоичного сигнала (б), осциллограмма изменения оптической мощности на выходе модулятора (в).

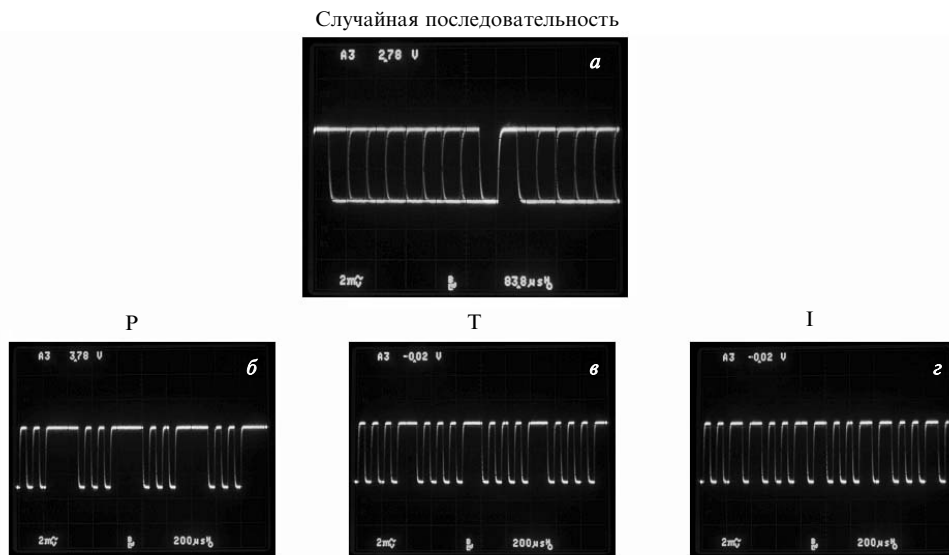


Рис.3. Осциллограммы сигнала на выходе фотоприемника после дискриминатора: случайная последовательность символов (а), символ Р (б), символ Т (в), символ I (г).

8-битного ASCII-кода, а также передача аббревиатуры РТИ (ФТИ). При передаче случайной последовательности импульсов на осциллографе наблюдается так называемая eye-диаграмма. Наблюдения eye-диаграммы показали хорошую дискриминацию между уровнями двоичного сигнала, что свидетельствует о низком уровне BER.

4. Заключение

Таким образом, нами была экспериментально продемонстрирована возможность формирования, передачи и детектирования частотно-модулированного оптического сигнала при помощи электрооптически управляемых брэгговских решеток. Разработанный новый тип интегрально-оптического частотного модулятора обеспечивает высокий параметр девиации частоты (25 ГГц) без значительных изменений мощности выходного сигнала. Следует отметить, что, хотя при демонстрации исполь-

зовалась низкая скорость передачи данных (19200 бит/с), электрооптический способ управления и высокий параметр девиации частоты потенциально может обеспечивать скорость передачи данных 10 Гбит/с и выше. Результаты работы наиболее интересны для построения локальных оптических сетей, систем опроса датчиков и бортовых систем телекоммуникаций и телеметрии.

Работа поддержана Федеральным агентством по науке и инновациям (гос. контракт № 02.514.11.4007).

1. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. *Lightwave Russian Edition*, № 4, 21 (2005).
2. Subbarayan Pasupathy. *IEEE Commun. Mag.*, July, 14 (1979).
3. Ralston J.D., Kahn J.M., Ho K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4872**, 4872-04 (2002).
4. Jong-In Shim Olesen H., Yamazaki H., Yamaguchi M., Kitamura M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **1**, 514 (1995).
5. Шамрай А.В., Козлов А.С., Ильичев И.В., Петров М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 734 (2005).