

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет радиозлектроники
Академия наук прикладной радиозлектроники
ЗАО «НПК «Наука»
НТО РЭС Украины
НТО РЭС им. А.С. Попова РФ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**2-й Международной научной конференции
«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА.
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»**

30 сентября - 3 октября 2009г.

Харьков - Кацевели
2009

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА В DWDM СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Мачехин Ю.П., Вознюк Е.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. ФОЭТ, тел. (057) 70-21-484,
E-mail: yuri_m49@mail.ru; факс (057) 702-14-84

In this article is given research work devoted to using stabilised spectrum of femtosecond laser in modern DWDM systems. Block scheme of the of stabilisation of a frequency spectrum of femtosecond laser by optical standart of frequency Nd:YAG/¹²⁷I₂ laser is resulted.

Современные проводные и мобильные системы связи и передачи информации являются самыми востребованными на рынке информационных услуг. Эти системы связи находятся в постоянном развитии, поскольку растущие объемы передаваемой информации требуют уникальных объемов и скоростей передачи информации. Одним из основных направлений увеличения скорости передачи информации в существующих волоконно-оптических магистральных линиях связи является увеличение количества оптических каналов или количества несущих оптических частот. Существующие DWDM системы построены на дискретном наборе источников лазерного излучения, который является их наиболее слабым местом, ограничивающим дальнейшее развитие пропускной способности и скорости передачи информации.

Хорошо известно [1], что для обеспечения единства используемых оптических частот в DWDM системах сформирован стандартный набор частот, обеспечиваемый набором лазеров. Стандартизация DWDM систем, была выполнена под руководством сектора стандартизации и телекоммуникаций Международного союза электросвязи ИТУ-Т (International Telecommunications Union). Эта работа привела к принятию в оптических сетях частотного плана ИТУ. Этот частотный план представляет собой набор стандартных частот ν на основе базовой частоты 193100 ГГц ($\lambda=1552,52$ нм). Стандартные частоты располагаются выше и ниже этой частоты с частотным интервалом 50 ГГц. Последующие частотные каналы, ширина которых составляет 100 ГГц, составляют 105 стандартных каналов ИТУ-Т в диапазоне 1521,02-1605,74 нм.

Развитие частотного плана WDM и DWDM систем уже сейчас позволяет получать большую плотность каналов, а именно на формирование каналов шириной в 50 ГГц (0,4 нм) и даже 25 ГГц (0,2 нм). В ближайшей перспективе 10 ГГц (0,08 нм).

Все используемые устройства, предназначенные для разделения и объединения оптических каналов с указанными ширинами, реализуются с помощью одного физического принципа, а именно подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн. По этой причине современные оптические мультиплексоры и демultipлексоры создаются преимущественно на основе дифракционных решеток, тонкопленочных фильтров и, немного реже, на матрицах волноводных дифракционных и волоконных брэгговских решетках, разрешающая способность которых уже подходит к своему физическому пределу.

В работе обсуждается вопрос применения фемтосекундного лазера с позиций создания принципиально новой системы синхронизации частотных каналов DWDM систем, в связи с чем, в работе предлагается называть такие системы FLN (Femtosecond Laser Network) [2]. Основная задача, связанная с эффективным применением FLN заключается в синхронизации оптических частот всей сети на основе одного оптического стандарта частоты.

Хорошо известно [2], что непрерывная последовательность ультракоротких импульсов излучения лазера с синхронизацией мод в спектральной области представляет собой частотную гребенку, характеристики которой определяются условиями генерации лазера. При длительности генерируемого импульса в десятки пикосекунд, количество генерируемых мод в лазере может достигать нескольких сотен даже тысяч. Если осуществить компрессию или сжатие импульсов, то осуществляется спектральное

расширение, т.е. увеличивается количество спектральных компонент. Дальнейшее увеличение количества спектральных компонент возможно за счет нелинейной трансформации частотного спектра в таких средах как, например, волоконные фотонные кристаллы. Более подробное описание физических принципов работы современных фемтосекундных лазеров можно найти, например, в [3,4].

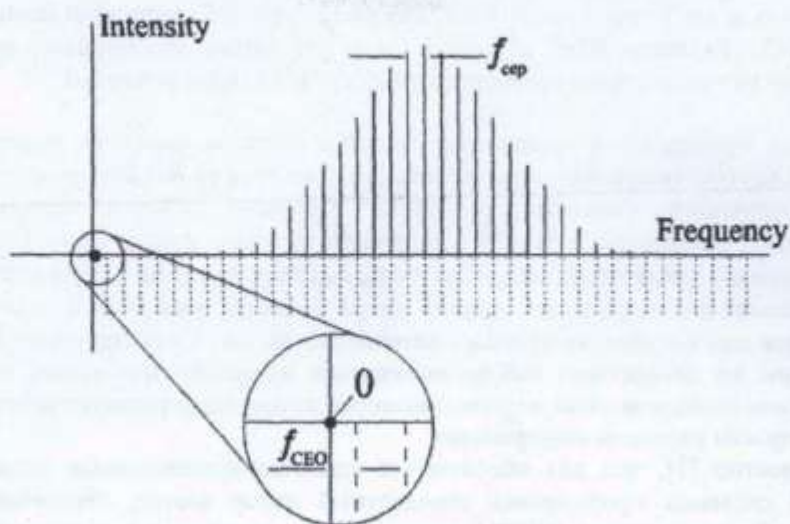


Рис.1

Первоначально формируемый частотный спектр периодического импульсного оптического излучения представляет собой дискретный спектр, у которого частотный интервал между составляющими, определяется через временные интервалы между импульсами, которые в свою очередь определяются через время полного обхода резонатора, т.е. длиной резонатора L . Таким образом, расстояние между спектральными компонентами определяется через величину межмодового интервала

$$\Delta f = c / 2L \quad (1)$$

В зависимости от длины резонатора лазера Δf может составлять величину от 50 МГц до 1 ПГц и более.

В общем случае частотный спектра излучения фемтосекундного лазера характеризуется двумя величинами, физический смысл которых понятен из пояснений на Рис.1. Первая величина - частотный интервал между спектральными компонентами, определяется через частоту следования импульсов f_r (r-repetition), которая равна межмодовому интервалу

$$f_r = \Delta f \quad (2)$$

Вторая величина - f_{ceo} (ceo-carrier envelope offset), определяет сдвиг всего частотного спектра относительно нуля, т.е. фактически определяет абсолютное значение частот каждой из компонент спектра.

Наличие частотного сдвига f_{ceo} т.е. сдвига частоты первой компоненты "идеальной" частотной сетки относительно $f = 0$, обусловлено отличием между величинами фазовой и групповой скоростями распространения излучения в резонаторе лазера.

Частота каждой отдельной составляющей дискретного спектра определяется её номером N , интервалом между компонентами f_r и f_{ceo} .

$$f_N = Nf_r + f_{ceo} \quad (3)$$

Экспериментально численное значение частоты f_r можно определить по спектру сигнала детектирования многочастотного излучения фемтосекундного лазера по гомодинной схеме [4]. Иначе, f_r определяется путем прямых измерений частоты биений между гармониками спектра излучения фемтосекундного лазера при помощи высокоточных частотомеров.

Частотный сдвиг f_{ceo} можно определить несколькими способами. Однако каждый из них связан с тем, что для измерения этой величины необходим внешний оптический частотный репер.

Для использования каждой спектральной компоненты f_N импульсного излучения фемтосекундного лазера в качестве оптического частотного канала DWDM систем требуется знание абсолютного значения частоты этой компоненты. Для этого необходимо, во-первых, знать частотное расстояние между спектральными компонентами f_r , характерное для используемого лазера, во-вторых, знать значение величины f_{ceo} и, в - третьих, обеспечить стабильность значений этих частот. Дополняя фемтосекундный лазер системами стабилизации величин f_r и f_{ceo} , т.е. системами стабилизации длины резонатора и стабилизации соотношения между фазовой и групповой скоростями в резонатора лазера, можно реализовать частотный план с требуемой стабильностью частот во всех оптических каналах.

Установлением значений величин f_N фактически формируется частотный план DWDM систем, аналогичный ITU-T, но с использованием совершенно новой физической базы, а именно многочастотного лазерного излучения.

При построении частотного плана на основе спектра излучения фемтосекундного лазера необходимо учесть, что расстояние между гармониками спектра излучения лазера определяет частотное расстояние между оптическими частотными каналами. Понятно, что расстояние между каналами DWDM систем в этом случае будет определяться величиной f_r или, что особенно важно, длиной резонатора лазера. Например, для обеспечения частотных расстояний между оптическими каналами в 5ГГц и больше необходимо использовать фемтосекундные лазеры с длиной резонатора 30мм и меньше. Создание таких лазеров в свою очередь является сложной самостоятельной технической задачей. Таким образом, возможность формирования частотного плана на основе дискретного спектра излучения фемтосекундного лазера зависит от его технических характеристик.

Существуют методы формирования частотного плана на частотах кратных f_r , однако такие лазеры, пока еще не стали широкодоступными, поэтому в настоящей работе их использование не обсуждается.

Вне зависимости от принципов построения частотного плана DWDM системы, у фемтосекундного лазера должна быть обеспечена стабилизация значений частот f_r и f_{ceo} . Хорошо известны результаты по созданию систем стабилизации частотного спектра фемтосекундного лазера, используемого в целях измерения абсолютного значения оптических частот. В тоже время, вопрос стабильности спектра излучения фемтосекундного лазера, как частотной сетки реализующей частотный план аналогичный ITU-T, в литературе не дискутировался. Ниже будет показано, какие особенности необходимо учитывать, чтобы реализовать частотный план для DWDM систем.

Структурная схема устройства, с помощью которого можно обеспечить практическую реализацию частотного плана DWDM систем, представлена на Рис.5.

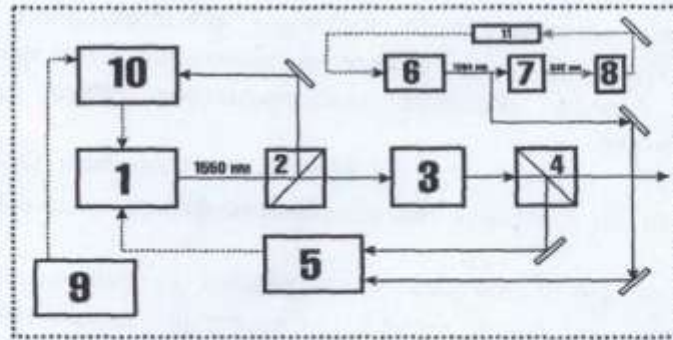


Рис. 5

В состав устройства входит: 1 – фемтосекундный лазер, центральная длина волны излучения которого находится около 1550 нм; 2 – делительный кубик с коэффициентом разделения 1:10, с помощью которого выделяется сигнал для измерения и стабилизации величины f_r ; 3 – волокно на основе фотонного кристалла, используемое для расширения спектра излучения фемтосекундного лазера; 4 – делительный кубик с широкополосным просветлением граней, который обеспечивает деление мощности падающего излучения с коэффициентом разделения 1:10 для системы стабилизации и на рабочий выход излучения, 5 – гетеродинное устройство обеспечивающее регистрацию частоты сигнала биений между стандартом частоты и N -ой гармоникой спектра излучения совмещенное с устройством стабилизации f_{ceo} ; 6 – Nd:YAG лазер; 7 – нелинейный кристалл; 8 – йодная ячейка; 9 – рубидиевый генератор; 10 – устройство для стабилизации f_r ; 11 – устройство для стабилизации Nd:YAG лазера.

Особенность предложенной схемы заключается в том, что она не зависит от используемых типов фемтосекундного лазера и оптического стандарта частоты. В том случае, когда частотный спектр фемтосекундного лазера обеспечивает перекрытие всего спектрального диапазона DWDM и достигает границы в 1000 нм, в структуру устройства может быть включен в качестве стандарта частоты Nd:YAG/ $^{127}\text{I}_2$ лазер. Nd:YAG/ $^{127}\text{I}_2$ лазер позволяет реализовать стабильность и воспроизводимость частотной сетки во всем спектральном диапазоне с относительной неопределенностью $5 \cdot 10^{-11}$.

В том случае, когда используемый многочастотный лазер обеспечивает перекрытие диапазона от 1450 нм до 1650 нм, то в качестве стандарта частоты можно использовать одномодовый полупроводниковый лазер со стабилизацией частоты по молекулярным линиям поглощения в ацетилене. В этом случае относительная неопределенность воспроизведения частотной сетки составит $1 \cdot 10^{-9}$.

Литература

- [1] Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. Москва: EXFO, 2001. 252 с.
- [2] Schmid R.P., Schneider T., Reif J. Femtosecond all-optical wavelength and time demultiplexer for OTDM/WDM systems // Appl. Phys. B. 2002. V. 74 [Suppl.], S205–S208
- [3] Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. Москва: Наука, 1988. 310 с.
- [4] Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, №2. С. 95–119.