

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА В DWDM СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ. Часть 1

Е.В. ВОЗНЮК, Ю.П. МАЧЕХИН

В статье приведены исследования по использованию стабилизированного спектра фемтосекундного лазера в современных DWDM системах. Приведена структурная схема стабилизации частотного спектра фемтосекундного лазера по оптическому стандарту частоты Nd:YAG/¹²⁷I₂ лазера.

In this article research connected with using stabilised spectrum of femtosecond laser in modern DWDM systems are presented. Block scheme of stabilisation of frequency spectrum of femtosecond laser by optical standart of frequency Nd:YAG/¹²⁷I₂ laser is given.

ВВЕДЕНИЕ

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.

Успешная работа сетей WDM и DWDM во многом зависит от стабильности частоты излучения используемых полупроводниковых лазеров. Частота каждого лазера, настроенного на соответствующий частотный интервал, должна находиться в пределах этого диапазона, т.е. в пределах 100 ГГц. В настоящее время для стабилизации частоты полупроводниковых лазеров,

формирующих частотный план, используются стабилизаторы длин волн, которые отслеживают и стабилизируют длину волны в пределах установленного частотного интервала в 100 ГГц, основанные на методе управления температурным режимом работы лазеров. Кроме того, устройства мультиплексирования и демultipлексирования, используемые в WDM и DWDM системах, могут разделить частотные каналы, располагающиеся по отношению друг к другу не ближе, чем 100 ГГц или 0,8 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.

Дальнейшее увеличение плотности каналов требует изменения принципов и технологий формирования оптических каналов, их частотного разделения, а также принципов модуляции и демодуляции.

Понятно, что перспектива развития WDM и DWDM систем должна основываться в первую очередь на новых физических идеях и современных лазерных устройствах. К ним, в первую очередь, относятся современные многочастотные лазерные источники излучения, позволяющие создавать принципиально новые оптические системы передачи и приема информации. В этой связи наиболее перспективным представляется развитие волоконно-оптической связи, переда-

ющие системы которой формируются на базе таких лазерных устройств, у которых генерируемое количество оптических частот излучения обеспечивает полное перекрытие всего частотного диапазона ИТУ-Т. Кроме того, использование таких лазерных устройств позволит обеспечить действующие DWDM системы оптическими каналами, количество которых может достигать нескольких тысяч (в перспективе сотен тысяч), что позволит существенным образом увеличить объем и скорость передаваемой информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС).

В настоящее время широко обсуждается возможность увеличения частотных каналов действующих DWDM систем (без изменения частотного плана ИТУ) за счет применения дискретного частотного спектра излучения фемтосекундного лазера [2].

Тем не менее, в настоящее время практическое использование фемтосекундного лазера в DWDM системах затруднено из-за ряда нерешенных задач как технических, так и физических. В этой связи целью исследований, результаты которых представлены в настоящей работе, было изучение особенностей применения в действующих DWDM системах связи излучения фемтосекундного лазера. Основываясь на характеристиках спектра излучения фемтосекундного лазера, в работе обсуждаются условия применения последнего в качестве источника излучения для DWDM систем. Учитывая, что у этих лазерных источников излучения, количество дискретных оптических каналов, число которых может составлять от нескольких сотен до нескольких миллионов, а, следовательно, расстояние между частотными каналами может быть значительно меньше 10 ГГц, в работе рассматриваются физические принципы модуляции оптических частот, обеспечивающей независимое воздействие на каждый оптический канал. В этой связи в работе также обсуждаются физические принципы методов и устройств, обеспечивающих модуляцию и демодуляцию оптических каналов, созданных многочастотным излучением одного лазерного источника без их выделения из спектрального состава излучения последнего.

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) [3]. Основная задача, связанная с эффективным применением FLN, заключается в синхронизации оптических частот всей сети на основе одного оптического стандарта частоты.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Если в резонаторе лазера созданы условия, обеспечивающие генерацию большого количества

продольных мод с синхронизованными временными фазами, то в результате интерференции мод возникают биения, приводящие к генерации периодической последовательности оптических импульсов. Длительность импульсов определяется временем, в течение которого все моды остаются синхронизованными.

Хорошо известно [4], 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 [5]. Более подробное описание физических принципов работы современных фемтосекундных лазеров можно найти, например, в [6, 7].

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 ГГц и более.

В общем случае частотный спектр 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.

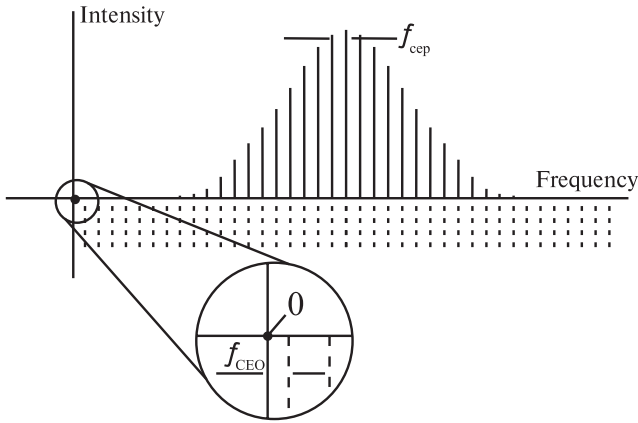


Рис. 1

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 [8]. 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 резонаторе 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 гармони-

ками 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 5 ГГц и больше необходимо использовать фемтосекундные лазеры с длиной резонатора 30 мм 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.

Есть другой путь создания частотного плана на базе спектра излучения фемтосекундного лазера. Используется лазер с малым значением f_r (большая длина резонатора), но при этом частотный план будут формировать с помощью выделенных гармоник, которые отстают на установленном частотном расстоянии, т.е. расстояние между частотными каналами будет равно mf_r , где $m \gg 1$. Однако в этом случае потребуются узкополосные фильтры, которые будут выделять требуемые гармоники при формировании частотного плана [9].

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.

2. ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

Среди активных сред с широкой полосой генерации, которые используются в фемтосекундных лазерах, есть как минимум две, которые обеспечивают генерацию фемтосекундных импульсов в ближнем ИК (1300-1600 нм) диапазоне. Это хром:форстерит ($\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$), который обеспечивает генерацию в диапазоне 1,3 мкм и хром: алюмоиттриевый гранат ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$), работающий в диапазоне 1,5 мкм (рис. 2) [10].

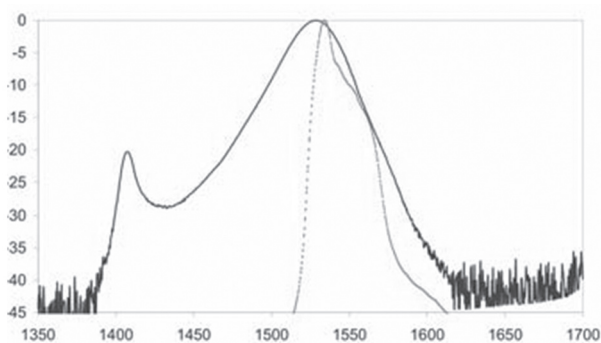


Рис. 2

Кроме компактных твердотельных лазеров, в оптической связи используются волоконные усилители и лазеры, с активированными эрбием активными средами. Самым перспективным с точки зрения решения поставленных в настоящей статье задач является титан:сапфир (Ti:Sapphire) лазер, спектр которого расширен с помощью волоконных фотонных кристаллов. На рис. 3 [11] приведен спектр излучения Ti:Sapphire фемтосекундного лазера, который расширен с помощью волоконных фотонных кристаллов.

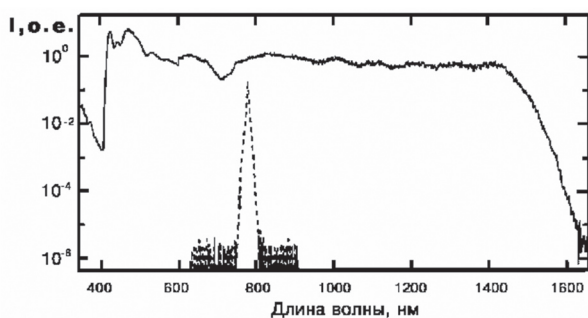


Рис. 3

Для решения задачи стабилизации и синхронизации спектра излучения фемтосекундного лазера, используемого в составе DWDM систем, необходимо использовать два внешних стандарта частоты. Один из них должен быть использован для стабилизации значения f_r , в результате чего достигается синхронизация всего частотного спектра. Поскольку значения f_r находятся в области радиочастот, то для стабилизации этой величины можно использовать рубидиевый стандарт частоты [12].

Второй стандарт частоты используется для стабилизации f_{ceo} . Несмотря на то, что значения этой величины также находятся в области радиочастот, для задачи стабилизации ее величины требуется использовать оптический стандарт частоты. В качестве такого стандарта частоты необходимо использовать стабилизированный по частоте лазер, частота излучения которого находится в пределах частотного спектра излучения фемтосекундного лазера. При выборе оптического стандарта частоты, т.е. стабилизированного по частоте лазера, необходимо руководствоваться международными рекомендациями, которые вы-

работаны на основе многолетних исследований стабилизированных по частоте лазерных источников излучения.

В настоящее время, в соответствии с решениями Консультативного Комитета по Длине Генеральной Конференции по Мерам и Весам [13], для обеспечения единства измерений в области длины (времени и частоты) рекомендованы 13 оптических стандартов частоты (длины волны), характеристики которых обеспечивают необходимую точность измерений частоты (длины волны). В рекомендации вошли лазеры, работающие в УФ, видимой и ИК областях оптического диапазона.

Для обеспечения частотных измерений в оптических телекоммуникациях в список рекомендованных стандартов частоты (длины волны), включен полупроводниковый лазер с длиной волны 1542 нм, частота которого стабилизируется по линиям поглощения P(16) ацетилена $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$. Относительная стандартная неопределенность, с которой устанавливается абсолютное значение длины волны (частоты) излучения, равна $5,2 \cdot 10^{-10}$. Для обеспечения синхронизации частотного спектра фемтосекундного лазера, указанный лазер имеет все необходимые параметры. Единственная проблема, связанная с его применением, заключается в том, что эти лазеры в настоящее время серийно не выпускаются. Следовательно, для обеспечения синхронизации фемтосекундного лазера в DWDM системах требуется его изготовление и исследование совместно с фемтосекундным лазером.

Другим решением по обеспечению синхронизации частотного спектра фемтосекундного лазера в этом диапазоне является использование чип-лазера Nd:YAG/ $^{127}\text{I}_2$. Особенность этого лазера заключается в том, что в нем осуществляется одновременная генерация основной частоты излучения (длина волны 1064 нм) и ее второй гармоники (длина волны 532 нм). При этом по линиям насыщенного поглощения в парах молекулярного йода $^{127}\text{I}_2$ стабилизируется частота второй гармоники. Стабилизируя частоту второй гармоники (f_{532}) излучения лазера путем коррекции длины резонатора лазера, стабилизируется и основная частота излучения f_{1064} . Поэтому излучение этого лазера имеет две стабилизированные длины волны излучения – 1064 нм и 532 нм. Относительная стандартная неопределенность установления значений этих длин волн составляет $8,9 \cdot 10^{-12}$.

Использование Nd:YAG/ $^{127}\text{I}_2$ для стабилизации f_{ceo} будет эффективным только тогда, когда спектр излучения фемтосекундного лазера будет расширен в область длин волн 1000 нм.

На рис. 4 представлена условно сетка частот фемтосекундного лазера, на которую наложены частоты Nd:YAG/ $^{127}\text{I}_2$ лазера. Разность частот f_b^{1064} между частотой оптического стандарта f_{1064} (отмечено жирной линией) и ближайшей к нему спектральной компонентой (отмеченной номе-

ром N) является основным информационным параметром, по которому можно судить о поведении f_{ceo} . Поэтому величина f_b^{1064} в предлагаемой модели может быть использована для стабилизации всей частотной сетки фемтосекундного лазера. Уравнения для частот, позволяющих связать частоты оптического стандарта и фемтосекундного лазера, можно представить в следующем виде:

$$f_{1064} = Nf_r + f_{ceo} + f_b^{1064}, \quad (4)$$

$$f_{532} = 2f_{1064}.$$

Стабилизация осуществляется путем сохранения значения f_b^{1064} неизменным и стабильным.

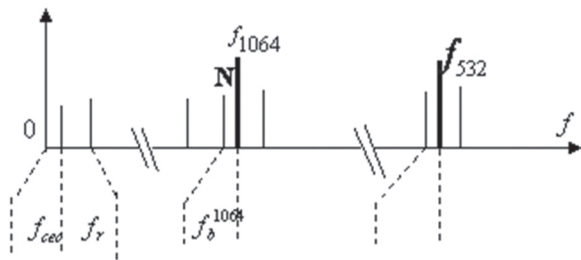


Рис. 4

В общем случае значение f_b^{1064} может быть произвольным и основным условием стабилизации может быть условие

$$f_b^{1064} = 0. \quad (5)$$

Однако, если исходить из требования, что при стабилизации величины f_b^{1064} должно осуществиться совпадение абсолютной частоты одной из гармоник частотного спектра с базовой частотой ИТУ – 193100 ГГц ($\lambda=1552,52$ нм), то необходимо использовать дополнительное частотное соотношение

$$Mf_r + f_{ceo} = f_{ITU}. \quad (6)$$

Здесь f_{ITU} – базовая частота, а M – номер гармоники, частота которой совпадает с базовой частотой.

Одновременное выполнение соотношений (4) и (6) позволяет определить значение f_b^{1064} (отличное от нуля), при котором формируемая частотная сетка будет иметь в качестве исходной частоты базовую частоту ИТУ. Физическое пояснение условия выполнения этих уравнений заключается в том, что в зависимости от значения f_r , соответствующего выбранному типу фемтосекундного лазера, путем перестройки дисперсионных свойств резонатора (т.е. изменением величины f_{ceo}) устанавливается такое значение f_b^{1064} , при котором одна из гармоник частотного спектра совпадает с базовой частотой ИТУ.

Исключая из системы уравнений (4) и (6) – f_{ceo} , можно получить уравнение для частоты f_b^{1064} , которое и является условием стабилизации частотного спектра

$$|f_b^{1064}| = |f_{1064} - f_{ITU} + (M - N)f_r|. \quad (7)$$

Частоты берутся по модулю, поскольку знак частот биений в этих уравнениях не учитывается. Если значения M и N определены, то известно численное значение сигнала биений, которое должно стабилизироваться.

Если в полученном условии (7) изменить частоту внешнего стандарта частоты, то это приведет только к изменению величины N и, соответственно, к изменению f_b^{1064} . В этом смысле (7) можно считать универсальным условием, не зависящим от типа внешнего оптического стандарта и длины волны (частоты) его излучения.

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

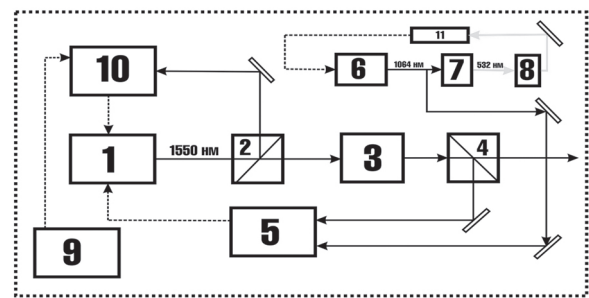


Рис. 5

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 $1 \cdot 10^{-9}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие оптической связи естественным образом связывается с использованием последних достижений лазерной физики и техники. Одним из таких достижений, за которое в 2005 году была присуждена нобелевская премия, стали оптические частотные гребенки, формируемые фемтосекундными лазерами с синхронизированными модами. Расширяя временные и частотные измерения, основанные на этих достижениях, в область ближнего ИК, стало крайне интересным и актуальным применение фемтосекундных лазеров как источников многочастотного монохроматического излучения в составе DWDM систем.

В работе были рассмотрены условия формирования частотного плана на базе излучения фемтосекундного лазера. Показано, что без дополнительных технических мер применение многочастотного лазерного излучения будет малоэффективным. К этим мерам в первую очередь относятся вопросы стабилизации параметров частотной сетки генерируемой фемтосекундным лазером. Предложены принципы, по которым должна осуществляться стабилизация частотного спектра, чтобы последний можно было использовать в качестве частотного плана DWDM систем.

Показано, что неотъемлемой частью предлагаемого в работе устройства, как источника стабилизированного многочастотного излучения, является оптический стандарт частоты, т.е. стабилизированный по частоте лазер. В работе предложено использовать два типа оптических стандартов частоты в зависимости от требований к воспроизводимости частот формируемого частотного плана. Используемые стандарты позволяют, во-первых, обеспечить стабильность внутренней структуры частотной сетки, во-вторых, поддерживать воспроизводимость значений каждой частотной составляющей спектра. По этой причине структура предлагаемого устройства позволяет осуществлять замену как самих источников многочастотного излучения, так и стандартов частоты, обеспечивающих характеристики частотного плана DWDM систем не подвергая кардинальным изменениям схему всего устройства.

Литература.

- [1] *Андрэ Жирар*. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. Москва: EXFO, 2001. 252 с.
- [2] *Takara H. et al.* More than 1000 channel optical frequency chain generation from single supercontinuum source with 12.5 GHz channel spacing // *Electron Lett.* 2000. Vol. 36, No 25. pp. 2089-2090,
- [3] *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
- [4] *Багаев С.Н.* Фемтосекундная лазерная физика // *Успехи современной радиоэлектроники.* 2004. № 5-6. – С. 70-85.
- [5] *Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J.* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // *Opt. Lett.*, 2000, V. 25, p. 25-27.
- [6] *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. Москва: Наука, 1988. 310 с.
- [7] *Крюков П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов // *Квантовая электроника.* 2001. Т. 31, №2. С. 95-119.
- [8] *Schnatz H.* Measurement of optical frequencies and frequency ratios // *Measu. Sci. Technol.* 2003. V.14, pp1200-1215.
- [9] *Holloway W.T., Keating A.J., Sampson D.D.* Multiwavelength source for spectrum sliced WDM access networks and LAN's // *IEEE Photonics Technology Letters/* 1997. V. 9, pp 1014-1016.
- [10] *Tamaru T., Petek H.* Femtosecond Cr⁴⁺:YAG laser with an L-fold cavity operating at a 1.2 GHz repetition rate // *Opt. Lett.* 2000. V.25, pp 584-585.
- [11] *Ranka J. K., Windeler R. S., and Stentz A. J.* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // *Opt. Lett.* 2000, V. 25, No. 1, pp. 25-27.
- [12] *Герасимов А.В., Капралов В.П., Шимко А.А.* Стабилизация спектра излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33, вып. 12. С.89-94.
- [13] *Quinn T. J.* Recommendation 1 (CI-2002): Revision of the practical realization of the definition of the metre // *Metrologia.* 2003. V.40, pp 103–133.



Поступила в редколлегию 29.10.2008

Вознюк Евгений Викторович, стажер-исследователь кафедры ФОЭТ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: фемтосекундные лазеры, волоконная оптика, волоконно-оптические системы передачи данных.



Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ФОЭТ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: лазерная и оптоэлектронная измерительная техника.