

Генерация суперконтинуума в волоконных структурах под действием непрерывной последовательности УКИ*

Е.М.Дианов, П.Г.Крюков

Рассматривается генерация суперконтинуума в волоконных структурах, необходимого для применений в прецизионной метрологии оптических частот и в системах волоконно-оптической связи.

Ключевые слова: фемтосекундные лазеры, суперконтинуум, оптическое волокно, мультиплексирование по длинам волн, метрология оптических частот.

1. Введение

Генерация предельно коротких импульсов излучения является одной из важнейших проблем лазерной физики и квантовой электроники. Уменьшение длительности импульса лазерного излучения открывает возможности достижения предельно высоких интенсивностей, измерения предельно коротких интервалов времени и исследования сверхбыстрых процессов в самых различных областях науки и техники.

За годы, прошедшие с появления первых лазеров, достигнут огромный прогресс как в области уменьшения длительности импульса, так и в области увеличения мощности и интенсивности лазерного излучения. Современные лазеры способны генерировать импульсы длительностью не более 5 фс, что составляет менее двух периодов волны излучения. При этом пиковая мощность лазерного излучения превышает 1 ПВт, а интенсивность при его фокусировке – 10^{21} Вт/см². Более подробное изложение результатов исследований в фемтосекундной области можно найти в обзоре [1].

Возможность генерации импульсов длительностью менее 100 фс в значительной мере обусловлена тем, что современные фемтосекундные лазеры работают в непрерывном режиме. Это позволяет использовать уникальные особенности спектра их излучения и реализовать предельную временную когерентность, благодаря которой открываются новые, весьма важные перспективы применения этих лазеров.

Сочетание лазеров УКИ с волоконно-оптическими элементами особой структуры позволяет создавать устройства, способные генерировать огромное число узких строго эквидистантных линий оптического излучения с постоянной интенсивностью (так называемые комб-ге-

нераторы оптических частот). Такие комб-генераторы обеспечивают прямое сопоставление частот оптического диапазона с частотами микроволновых стандартов частоты, что дает возможность радикально решить проблему создания оптических стандартов частоты.

Другим важным применением комб-генераторов являются устройства плотного мультиплексирования по длинам волн (DWDM) в системах волоконно-оптической связи. Осуществление DWDM рассматривается как революционный прорыв в области информатики [2]. В обоих указанных применениях требуются непрерывные лазеры с узкими линиями излучения и использование лазеров УКИ представляется весьма неожиданным.

Мы рассмотрим особенности спектра и временной когерентности лазеров УКИ, возможность практического использования этих особенностей и приведем результаты исследования генерации суперконтинуума под действием излучения непрерывного фемтосекундного лазера на Cr:форстерите.

2. Особенности спектра и временной когерентности излучения непрерывных фемтосекундных лазеров

Непрерывные лазеры фемтосекундных импульсов излучают строго периодическую последовательность УКИ (рис.1,а). Спектр такой последовательности импульсов

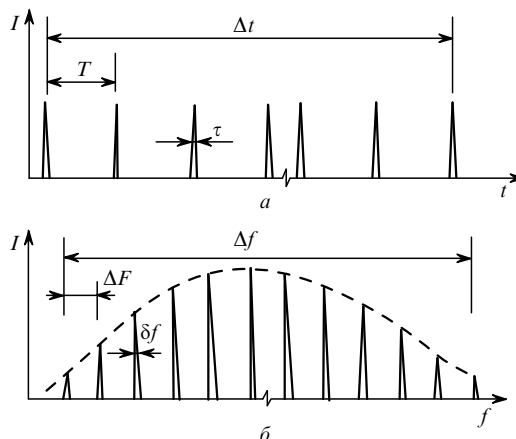


Рис.1. Зависимости интенсивности УКИ I от времени t (а) и частоты f (б).

*По материалам доклада на семинаре «Сверхбыстрые процессы в веществах и лазерные фемтотехнологии» (Н. Новгород, Институт прикладной физики РАН, 7–8 декабря 2000 г.).

Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kryukov@fo.gpi.ac.ru

Поступила в редакцию 1 марта 2001 г.

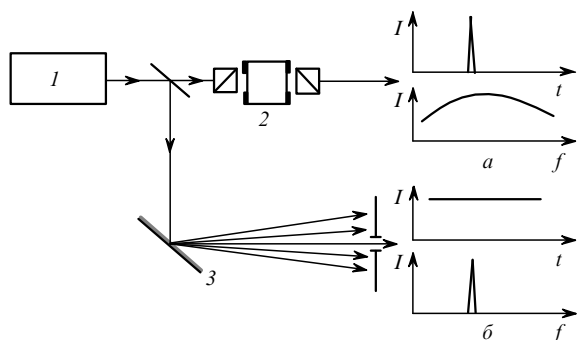


Рис.2. Зависимости интенсивности УКИ I от времени t и частоты f при выделении одиночного импульса (а) и одиночной линии (б) из излучения непрерывного лазера с самосинхронизацией мод 1 с помощью электрооптического затвора 2 и монохроматора 3.

является гребенкой эквидистантно расположенных дискретных линий (мод), разделенных интервалами, равными частоте повторения импульсов (рис.1,б). Зависимости интенсивности излучения от времени и частоты связаны фурье-преобразованием, поэтому $\Delta F \approx 1/T$, $\delta f \approx 1/\Delta t$, $\Delta f \approx 1/\tau$, где ΔF – частота повторения импульсов; δf – ширина линии; Δt – длительность последовательности импульсов; Δf – полная ширина спектра; τ – длительность импульса. Из этих соотношений следует, что при достаточно стабильной и долговременной непрерывной работе лазер УКИ испускает узкие линии с постоянной интенсивностью.

Рассмотрим две экспериментальные ситуации. Пусть из непрерывной последовательности УКИ с помощью электрооптического затвора выделяется одиночный импульс (рис.2,а). Тогда спектр излучения становится сплошным, а временная когерентность определяется длительностью импульса (предполагается, что импульсы являются фурье-ограниченными, т.е. не имеют чирпа). Если же из спектра непрерывного излучения надо вырезать одиночную линию (моду) (рис.2,б), то это можно сделать с помощью монохроматора с подходящей дифракционной решеткой. В этом случае интенсивность выделенного излучения становится постоянной, а временная когерентность определяется продолжительностью стабильной работы лазера. Таким образом, непрерывный фемтосекундный лазер является источником как УКИ, так и предельно узкой линии излучения.

Указанные свойства непрерывного фемтосекундного лазера проявляются в экспериментах двух типов. Например, в оптической когерентной томографии требуется предельно малая временная когерентность, поскольку ею определяется пространственное разрешение. Действительно, используя самые короткие импульсы с длительностью 5 фс, удалось реализовать разрешение, близкое к дифракционному пределу оптической микроскопии [3]. С другой стороны, фемтосекундные лазеры нашли применение в прецизионной метрологии оптических частот [4, 5] и в схемах мультиплексирования волоконно-оптической связи [6–8], где принципиально требуется непрерывное излучение с дискретными частотами.

3. Волоконно-оптические генераторы суперконтинуума

В обоих указанных применениях ширина спектра гребенки частот, излучаемых лазером, оказывается недостаточной. В современных линиях волоконно-оптической

связи в области 1.5 мкм ширина пропускания составляет около 3 ТГц. Это соответствует длительности импульса ~ 100 фс, что сравнительно легко реализуется в современных лазерах. Однако технические и эксплуатационные характеристики таких лазеров не соответствуют требованиям, предъявляемым к лазерам, используемым в волоконно-оптической связи.

Для метрологии оптических частот требуется ширина спектра гребенки, перекрывающая октаву, т.е. максимальная частота в гребенке должна быть в два раза больше минимальной. Однако даже при самой малой длительности импульса (5 фс на $\lambda = 0.8$ мкм) такая ширина не достигается. В связи с этим возникает проблема существенного увеличения ширины спектра гребенки с сохранением строгой эквидистантности.

Хорошо известно, что с помощью мощных УКИ можно осуществить генерацию излучения с непрерывным спектром, ширина которого во много раз превышает ширину спектра этих импульсов, – так называемый суперконтинуум (СК) [9]. Важно отметить, что генерация осуществима лишь при импульсном излучении. Механизм генерации – сложная комбинация таких нелинейных эффектов, как фазовая самомодуляция, четырехфотонное смешение, вынужденное комбинационное рассеяние и др. Экспериментально было показано, что излучение СК фазовокогерентно связано с излучением импульса, которое его вызывает [10]. В связи с этим, если генерацию СК осуществить с помощью эквидистантной последовательности импульсов, то и импульсы СК будут иметь ту же частоту повторения. Это, в свою очередь, означает, что СК будет состоять из эквидистантной гребенки линий.

Однако имеется принципиальная трудность. Ширина СК зависит от пиковой интенсивности и длины нелинейного взаимодействия. В современных фемтосекундных лазерах средняя мощность определяется мощностью лазерного источника накачки. Обычно она не превышает 1 Вт, а частота повторения импульсов составляет ~ 100 МГц, т.е. энергия одиночного импульса не превышает 10 нДж. При волоконно-оптической связи частота повторения (интервал гребенки) должна быть еще выше – 10 и даже 100 ГГц. Это, естественно, снижает пиковую интенсивность и, следовательно, эффективность генерации СК. Преодоление данной принципиальной трудности видится в компенсации уменьшения пиковой мощности увеличением длины нелинейного взаимодействия, приводящего к генерации СК.

Использование световодов дает прекрасную возможность осуществить все вышесказанное. Излучение, сфокусированное в одномодовое волокно и, следовательно, имеющее высокую интенсивность, может распространяться в нем на большие расстояния. Однако из-за дисперсии групповых скоростей (ДГС) при распространении в волокне длительность импульса увеличивается, уменьшая тем самым интенсивность. Для того чтобы обеспечить нужную длину нелинейного взаимодействия, необходима возможность целенаправленного изменения ДГС на заданных длинах волн УКИ. Поскольку в оптических волокнах ДГС определяется не только дисперсией материала волокна, но и волноводными свойствами, зависящими от показателей преломления сердцевины и оболочки, имеется принципиальная возможность изменять ДГС путем изготовления волоконных элементов со специальной структурой. Кроме того, можно

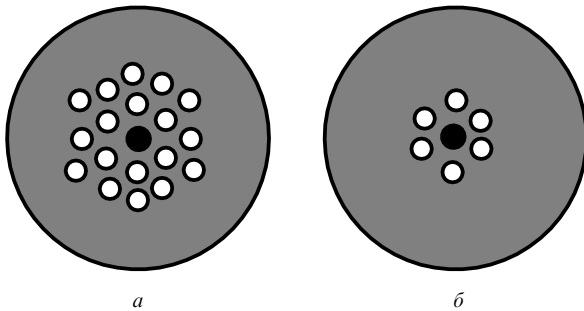


Рис.3. Типы микроструктурных волокон: фотонный кристалл (а), дырчатый волновод (б).

добиться существенной концентрации излучения с соответствующим увеличением нелинейного эффекта. Рассмотрим некоторые примеры.

3.1. Дырчатые волокна (структуры типа фотонных кристаллов)

Дырчатое волокно представляет собой одномодовый волновод, в оболочке которого имеется набор плотно упакованных воздушных трубок с диаметрами, меньшими диаметра сердцевины. Примеры таких структур показаны на рис.3. Трубки могут представлять собой периодическую двумерную структуру. Благодаря периодическому расположению воздушных отверстий (показатель преломления $n = 1$) в стекле ($n = 1.5$) спектр пропускания такой структуры для определенных направлений распространения света характеризуется наличием областей длин волн, на которых излучение не может проникать в оболочку, т. е. фотонных запрещенных зон. Это дало основания назвать подобные структуры фотонно-кристаллическими волноводами. Впервые об изготовлении таких волноводов было сообщено в работе [11]. Для генерации СК достаточно ограничиться одним слоем отверстий, поэтому наряду с термином «фотонно-кристаллические волноводы» употребляется термин «дырчатые волноводы», относящийся к более широкому классу волноводов со сложной структурой оболочки [12].

Одно из основных преимуществ дырчатых волноводов связано с возможностью реализации в них одномодового (по поперечным модам) распространения излучения в очень широкой спектральной области, охватывающей спектр излучения фемтосекундных лазеров на Ti:сапфире (0.8 мкм). За счет взаимной компенсации

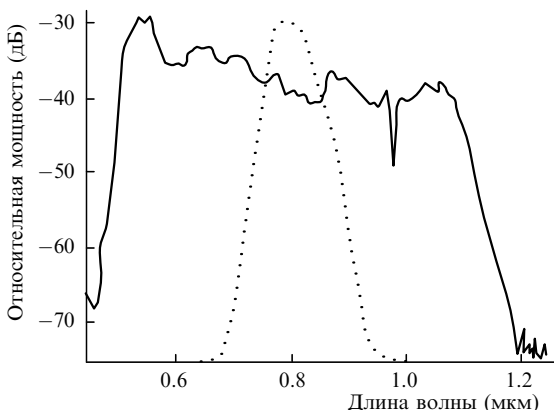


Рис.4. Спектр СК на выходе дырчатого волокна (сплошная кривая) и спектр лазера (пунктирная кривая) [11].

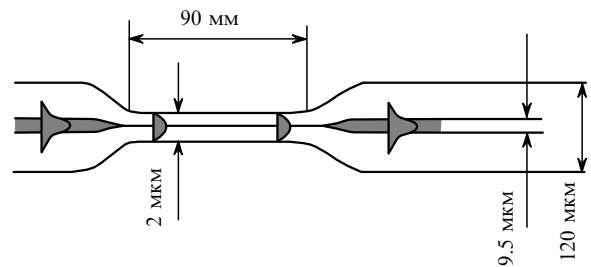


Рис.5. Схема волокна с перетяжкой и конусными переходами [14].

волноводной и материальной составляющих дисперсии дырчатые волокна позволяют сместить точку нулевой дисперсии групповых скоростей в видимую область.

Экспериментально возможность применения дырчатых волокон для генерации СК под действием непрерывной последовательности фемтосекундных импульсов лазера на Ti:сапфире с энергией не более 10 нДж была продемонстрирована в работе [13]. На рис.4 показаны спектры излучения лазера и СК. Видно, что спектр СК простирается более, чем на октаву. Благодаря этому генераторы СК на основе дырчатых волокон стали важнейшей частью лазерных фемтосекундных установок, на которых были получены блестящие результаты, вызвавшие подлинную революцию в метрологии оптических частот.

3.2. Конусные волоконные структуры с перетяжкой

Совсем недавно [14] была продемонстрирована возможность генерации СК, простирающегося от УФ до ближнего ИК диапазона (т. е. более чем на две октавы), при действии непрерывной последовательности фемтосекундных импульсов Ti:сапфир-лазера на другую волоконно-оптическую структуру. Ее вид показан на рис.5.

Волокно Corning SM-28 с длиной волны отсечки 1250 нм и числовой апертурой 0.1 вытягивалось с помощью управляемого разогрева. Получалась нить диаметром около 2 мкм, соединенная с концами исходного волокна конусными переходами. За счет такой конфигурации получается ДГС с нулем, сдвинутым в коротковолновую область. Длина нити составляла 90 мм.

При энергии одиночного фемтосекундного импульса 3.9 нДж получался спектр СК, простирающийся на уровне 20 дБ от 370 до 1545 нм. Этот спектр, а также спектр лазера показаны на рис.6. Таким образом, получался источник достаточно интенсивного одномодового

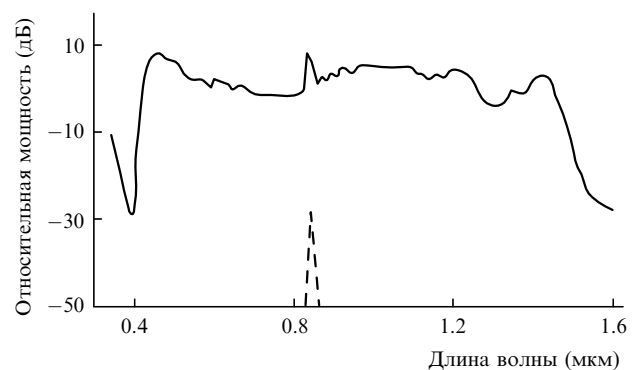


Рис.6. Спектр СК на выходе волокна с конусными переходами (сплошная кривая) и спектр лазера (штриховая кривая) [14].

(по поперечным модам) «белого» света. Поскольку СК генерируется под действием непрерывной последовательности импульсов, спектр этого «белого» света представляет собой гребенку эквидистантных частот.

3.3. Волокно со сдвигом дисперсии

Для волоконной связи нет необходимости генерировать СК с очень широким спектром, достаточно, чтобы его ширина составляла ~ 3 ТГц на длине волны 1.5 мкм. Однако эту ширину необходимо получить при использовании компактных и эффективных лазеров (волоконных и полупроводниковых) с импульсами длительностью 0.3–5 пс, пиковая мощность которых существенно меньше, чем у лазеров на вибронных кристаллах. В сочетании с полупроводниковыми и волоконными лазерами для генерации СК обычно используются одномодовые волокна длиной 1–3 км с особыми дисперсионными характеристиками [6–8].

4. Применения непрерывных фемтосекундных лазеров, основанные на их способности излучать непрерывные частоты

4.1. Мультиплексирование в системах волоконно-оптической связи

Для увеличения скорости передачи информации в системах связи используется мультиплексирование сигналов двух видов. В первом (рис.7,а) осуществляется временное уплотнение информации (TDM) за счет применения достаточно коротких импульсов. Современная электроника позволяет работать с импульсами длительностью до 10 пс, обеспечивая скорость передачи информации 2.5–40 Гбит/с. Для еще большего увеличения этой скорости используются параллельные каналы (рис.7,б) с разными несущими частотами, т.е. мультиплексирование с уплотнением по длинам волн (WDM).

Сущность WDM-метода заключается в том, что излучение с разными длинами волн (в настоящее время, как правило, от независимых источников света), несущее на каждой длине волны свою информацию, вводится в один волоконный световод с помощью специального устройства (мультиплексора), усиливается широкополосным

оптическим усилителем и распространяется по волоконно-оптической линии связи. На выходе этой линии после дополнительного усиления излучение разделяется по длинам волн с помощью демультиплексора. Увеличение скорости передачи достигается увеличением числа спектральных каналов, которое может превышать 100. Так, исследователи из корпорации NEC (Япония) сообщили о демонстрации передачи информации по волоконно-оптическому кабелю длиной 186 км со скоростью 6.4 Тбит/с на 160 каналах [15]. В качестве источников излучения обычно применяется набор стабилизированных по длине волны полупроводниковых лазеров с распределенной обратной связью.

Способность лазера УКИ излучать непрерывную строго эквидистантную последовательность импульсов со спектром, представляющим собой гребенку эквидистантных линий, дает, в принципе, возможность решения проблемы как временного, так и спектрального мультиплексирования. При этом для мультиплексирования можно использовать всего лишь один лазер вместо набора отдельных лазеров-передатчиков.

Недавно было сообщено о демонстрации передачи информации по 106 каналам со скоростью 10 Гбит/с на расстоянии 640 км с использованием в качестве передатчика непрерывного диодного лазера с синхронизацией мод в сочетании с генератором СК в оптическом волокне [16].

4.2. Прецизионная метрология оптических частот

Лазерные стандарты частоты – одно из важнейших достижений квантовой электроники [17]. Их создание требует определения частот сверхвысоких резонансов в оптическом диапазоне по отношению к частоте международного цезиевого стандарта, которая лежит в микроволновом радиодиапазоне (около 9.2 ГГц). Это означает, что необходима передача частотных характеристик из оптического диапазона (около 500 ТГц) в радиодиапазон без потери точности.

Для этой цели используют схемы радиооптических мостов [18]. Это весьма сложные и громоздкие установки, состоящие из цепи специально подобранных и синхронизованных по фазе лазеров ближнего и среднего ИК и субмиллиметрового диапазонов, генераторов СВЧ диапазона (клистроны и генераторы Ганна), а также быстродействующих преобразователей частот в интервалах между этими диапазонами. С помощью такой цепи реализуются схемы оптических часов и единого стандарта длины и времени [17]. Методика определения оптических частот, основанная на радиооптических мостах, использовалась до последнего времени, но из-за ее сложности была доступна лишь отдельным научным центрам национального масштаба.

Проблему сопоставления оптических и микроволновых частот можно альтернативно решить, если располагать источником многих оптических частот, разделенных постоянным интервалом, лежащим в радиодиапазоне, т.е. располагая стабильным комб-генератором оптических частот. Непрерывный лазер УКИ как раз и является таким источником.

Впервые идея использовать непрерывный лазер УКИ при создании оптических стандартов частоты и лазерной спектроскопии сверхвысокого разрешения была выдвинута В.П.Чеботаевым в [19, 20]. В этих работах было показано, что метод разделенных резонаторов, предложен-

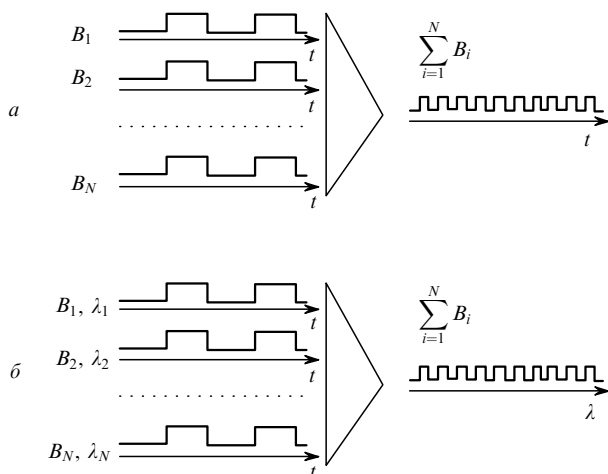


Рис.7. Уплотнение информации (мультиплексирование) в системах волоконно-оптической связи: временное (а) и по длинам волн (б); B_i – информационная емкость канала.

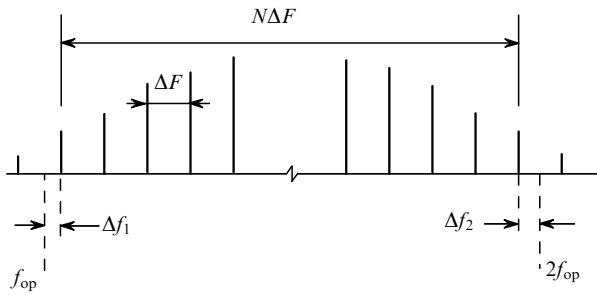


Рис.8. Принцип измерения оптической частоты f_{op} с помощью гребенки эквидистантных частот с интервалом ΔF в радиодиапазоне.

ный в [21] для получения узких резонансов в радиодиапазоне, можно, в принципе, перенести в оптический диапазон. Разумеется, разница на 4–5 порядков в длинах волн требует изощренной модификации этого метода.

Было показано, что разнесенные во времени импульсы могут быть эквивалентны разнесенным в пространстве резонаторам. В работе [22] эта идея была экспериментально реализована при использовании непрерывного лазера пикосекундных импульсов на красителе с синхронной накачкой.

В том случае, когда ширина спектра комб-генератора оптических частот простирается более, чем на октаву (т.е. когда $f_{max} > 2f_{min}$), появляется удобная альтернативная возможность прямого сопоставления оптической частоты, попадающей в ширину спектра комб-генератора, с частотой источника СВЧ диапазона. Принцип такого измерения оптической частоты поясняется на рис.8. Измерив частоты биений Δf_1 и Δf_2 соответственно между оптической частотой f_{op} , подлежащей измерению, и ее второй гармоникой $2f_{op}$ и ближайшими частотами комб-генератора в длинноволновом и коротковолновом концах гребенки, можно определить точное значение f_{op} из соотношения $f_{op} = 2f_{op} - f_{op} = N\Delta F + \Delta f_1 + \Delta f_2$, пересчитав число линий N в гребенке. Таким образом, комб-генератор оптических частот со спектральным диапазоном, простирающимся более чем на октаву, способен заменить радиооптический мост.

Из сказанного следует, что в обоих применениях один непрерывный лазер УКИ в сочетании с волоконно-оптическим генератором СК, в принципе, способен заменить весьма сложные системы, включающие многие лазеры.

5. Генератор СК с лазером на Cr:форстерите

Все опубликованные результаты по генерации СК с помощью фемтосекундных лазеров получены с использованием лазера на Ti:сапфире. Мы поставили эксперименты по исследованию волоконных структур с конусными переходами с использованием фемтосекундного лазера на Cr:форстерите, работающего на длине волны 1.25 мкм. Характеристики этого лазера приведены ниже:

Мощность накачки (Вт)	7.5
Порог самосинхронизации мод (Вт)	6.2
Средняя мощность (мВт)	320
Частота следования импульсов (МГц)	100
Минимальная длительность импульса (фс).....	67
Длина волны (мкм).....	1.25
Ширина спектра (нм).....	25

Волоконная структура с конусными переходами и перетяжкой имела размеры, показанные на рис.9. При-

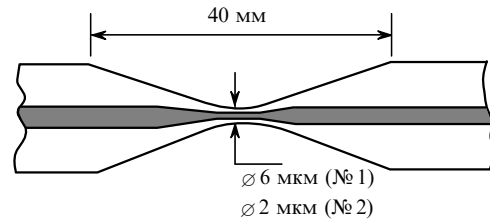


Рис.9. Схема волокна с перетяжкой диаметром 6 мкм (образец № 1) и 2 мкм (образец № 2).

менялись два образца с диаметром перетяжки 6 мкм (образец № 1) и 2 мкм (образец № 2). При фокусировании излучения фемтосекундного лазера в волокно микроскопным объективом отраженное от торца волокна излучение попадает в лазер и срывает самосинхронизацию мод, поэтому необходима фарадеевская развязка. К сожалению, мы располагали развязкой лишь для длины волны 1.3 мкм, поэтому максимальная средняя мощность, которую удавалось вводить в волокно, не превышала 150 мВт.

Спектры излучения до и после прохождения образцов № 1 и 2 показаны на рис.10, где хорошо видно уширение спектра. Отметим, что в отличие от результатов, приведенных на рис.8, здесь регистрация проводилась на уровне нескольких децибеллов. Длина перетяжки, как следует из рис.10, по-видимому, недостаточна для максимального уширения спектра СК.

6. Заключение

Совершенствование фемтосекундных лазеров привело к новому взгляду на них. Они не только являются источниками предельно коротких импульсов, но также

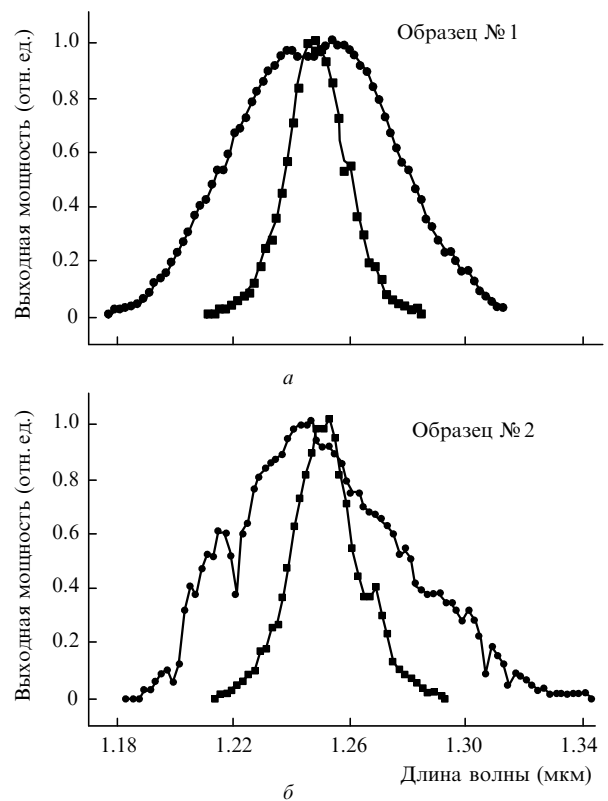


Рис.10. Спектры на входе (■) и выходе (●) образцов № 1 (а) и № 2 (б).

позволяют получать в сочетании с волоконно-оптическими устройствами гребенку огромного числа строго эквидистантных частот. Эта замечательная особенность привела к двум исключительно важным применениям фемтосекундных лазеров: в прецизионной метрологии частоты и в волоконно-оптической связи с мультиплексированием по длинам волн. Заметим, кстати, что оба эти применения тесно связаны – современная связь немыслима без точного измерения частот и интервалов времени.

В обоих применениях исключительная роль принадлежит элементам волоконной оптики. Во-первых, их использование позволяет создавать генераторы СК, без которых не были бы достигнуты столь выдающиеся успехи. Во-вторых, есть основания полагать, что разработка фемтосекундных волоконных лазеров приведет к созданию систем нового поколения, более компактных, эффективных и доступных. Очевидно, что работы в этой области являются весьма актуальными и перспективными.

1. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
2. Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **30**, 659 (2000).
3. Drexler W., Morger U., Kartner F.X., Pitris C., Voppart S.A., Li X.D., Ippen E.P., Fujimoto J.C. *Optics Letts*, **24**, 1221 (1999).
4. Udem T., Reichert J., Holzwarth R., Hänsch T.W. *Phys.Rev.Letts*, **82**, 3568 (1999).
5. Diddams S.A., Jones D.J., Ye J., Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windler R.S., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W. *Phys.Rev.Letts*, **84**, 5102 (2000).
6. Morioka T., Mori K., Saruwatari M. *Electron.Letts*, **29**, 862 (1993).
7. Morioka T., Kawanishi S., Mori K., Saruwatari M. *Electron.Letts*, **30**, 790 (1994).
8. Morioka T., Takara H., Kawanishi S., Kitoh T., Saruwatari M. *Electron.Letts*, **32**, 833 (1996).
9. Alfano R.R., Shapiro S.L. *Phys.Rev.Letts*, **24**, 584 (1970).
10. Bellini M., Hänsch T.W. *Optics Letts*, **25**, 1049 (2000).
11. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Optics Letts*, **21**, 1547 (1996).
12. Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
13. Ranka J.K., Windler R.S., Stentz A.J. *Optics Letts*, **25**, 25 (2000).
14. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Optics Letts*, **25**, 1415 (2000).
15. *Proc.Europ.Conf.ECOCS-2000* (Munich, Germany, 2000).
16. Takara H., Yamada E., Ohara T., Sato K., Jinguji K., Inoue Y., Shibata T., Morioka T. *Proc.CLEO QELS-2001* (Baltimore, MD, USA, 2001, CPD11-1).
17. Багаев С.Н., Чеботаев В.П. *УФН*, **148**, 143 (1986).
18. Chebotaev V.P., Goldort V.G., Klementyev V.M., Nikitin M.V., Timchenko B.A., Zakharyash V.F. *Appl.Phys.B*, **29**, 63 (1982).
19. Бакланов Ю.В., Чеботаев В.П. *Квантовая электроника*, **4**, 2189 (1977).
20. Baklanov Y.V., Chebotaev V.P. *Appl.Phys.*, **12**, 97 (1977).
21. Рамзей Н. *Молекулярные пучки* (М., ИЛ, 1960).
22. Eckstein J.N., Ferguson A.I., Hänsch T.W. *Phys.Rev.Letts*, **40**, 847 (1978).