

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

PACS 42.62.Eh; 42.55.Rz; 42.55.Wd; 42.65.Re; 42.65.Ky

Разработка прототипа компактного волоконного синтезатора частот для мобильных фемтосекундных оптических часов**В.С.Пивцов, Б.Н.Нюшков, И.И.Корель, Н.А.Коляда, С.А.Фарносов, В.И.Денисов**

Представлены результаты разработки и предварительных исследований прототипа компактного волоконного синтезатора частот на основе фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера и оригинального гибридного высоколинейного волокна. Разрабатываемый синтезатор обеспечит предельно низкий уровень относительной нестабильности синтезируемых частот (вплоть до 10^{-17}) при использовании соответствующего оптического стандарта и будет применяться в мобильных оптических часах. Реализованный принцип частотной стабилизации обуславливает универсальность синтезатора и позволяет с его помощью переносить частотную стабильность различных типов оптических стандартов на синтезируемые радиочастоты и частоты оптического диапазона.

Ключевые слова: фемтосекундный синтезатор частот, оптические часы, фемтосекундный волоконный лазер, гибридное высоколинейное волокно.

1. Введение

Фемтосекундный синтезатор частот является основой часового механизма в конструкции современных оптических квантовых часов [1–4], кратко именуемых фемтосекундными оптическими часами (ФОЧ). Он используется для непосредственного деления оптической частоты атомного осциллятора (оптического стандарта частоты) и тем самым обеспечивает возможность прямого синтеза стандартных радиочастот и формирования меток времени со стабильностью и точностью оптического стандарта. На практике точность хода ФОЧ ограничивается погрешностями, вносимыми часовым механизмом (нестабильностью синтезатора частот) и фундаментальными факторами, связанными с квантовой природой атомных осцилляторов.

Основным блоком любого фемтосекундного синтезатора частот, предназначенного для переноса стабильности и точности оптического стандарта частоты в радиодиапазон, является задающий фемтосекундный лазер с синхронизацией мод и системой активной стабилизации. Такой лазер должен обеспечивать стабильную генерацию гребенки эквидистантных оптических частот (соответствующих продольным модам лазера), параметры которой могут быть детерминированы с предельно высокой точностью при стабилизации по оптическому стандарту частоты.

В.С.Пивцов, И.И.Корель. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: clock@laser.nsc.ru

Б.Н.Нюшков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: nyushkov@laser.nsc.ru

Н.А.Коляда, С.А.Фарносов, В.И.Денисов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 17 марта 2014 г.

Для создания первых фемтосекундных синтезаторов, разработанных в самом начале 2000-х гг., применялись исключительно твердотельные фемтосекундные лазеры на основе дискретных элементов, главным образом кристаллов титан-сапфира [5, 6], хром-форстерита [7] и кристаллов легированных иттербием [8]. В надлежащих лабораторных условиях такие лазерные системы в принципе позволяют полностью использовать потенциал современных оптических стандартов в части передачи их стабильности в ФОЧ. Однако из-за принципиальных конструктивных ограничений этих систем их нельзя применять для создания мобильных ФОЧ. Это связано как с громоздкостью перечисленных лазерных систем, их большим энергопотреблением и низким КПД (в первую очередь это касается титан-сапфировых и хром-форстеритовых систем), так и со сложностью длительного поддержания прецизионной юстировки дискретной лазерной оптики в условиях внешних возмущений при автономной/мобильной эксплуатации вне лаборатории. В то же время реализация мобильных вариантов ФОЧ позволит значительно расширить сферу применения оптических квантовых часов. В частности, одной из наиболее актуальных прикладных задач, которые могут быть решены с использованием мобильных ФОЧ, является повышение точности глобальных спутниковых навигационных систем. Так, для достижения точности позиционирования ~ 10 см долговременная нестабильность опорных радиочастот в бортовых системах синхронизации глобальных навигационных спутниковых систем должна быть радикально уменьшена, вплоть до $\sim 10^{-16}$ [9]. Это возможно лишь при замене используемых сейчас микроволновых стандартов частоты с радиочастотными синтезаторами на мобильные ФОЧ (т. е. на оптические стандарты частоты с фемтосекундными синтезаторами частот).

В настоящее время наиболее перспективным подходом к созданию мобильных ФОЧ представляется использование волоконной оптики в качестве основы для фемтосекундного синтезатора частот. Принципиальная возможность применения волоконных лазерных систем для этих целей уже продемонстрирована в ряде работ [10–14].

Волоконные фемтосекундные лазеры отличаются предельной компактностью, низким энергопотреблением и высоким КПД. Кроме того, такие лазерные системы менее критичны к воздействию внешних возмущений в отношении возможной разъюстировки оптики, т. к. использование дискретных юстируемых оптических элементов в них может быть сведено к минимуму или вообще исключено. Для бортовых спутниковых систем наиболее целесообразным представляется применение волоконных лазерных систем на основе волокон, легированных эрбием, в силу их большей радиационной стойкости по сравнению с иттербиевыми волокнами. Рабочий диапазон длин волн эрбиевых волоконных лазеров более удобен для варьирования параметров лазерной системы и создания цельноволоконной конфигурации. В известных на сегодняшний день работах по фемтосекундным синтезаторам частот на основе эрбиевых волоконных лазерных систем не ставилась цель создания именно мобильных устройств. Поэтому разработанные системы конструктивно не оптимальны с точки зрения надежности и энергоэффективности. Кроме того, не исследованы в полной мере предельные возможности фемтосекундных волоконных синтезаторов по обеспечению частотной стабильности при совместной работе с разными компактными оптическими стандартами частоты – кандидатами для применения в мобильных ФОЧ. Известный вариант компактных ФОЧ с использованием волоконной лазерной системы и оптического стандарта разработан на основе компактного метанового стандарта частоты ($\text{He-Ne}/\text{CH}_4$), относительная нестабильность которого превышает 10^{-14} [4, 14].

Целью настоящей работы являются создание прототипа компактного энергоэффективного волоконного синтезатора оптических частот на основе малоомощной фемтосекундной волоконной эрбиевой лазерной системы совместно с компактным оптическим стандартом частоты и исследование предельных характеристик этого прототипа для демонстрации возможностей реализации мобильных ФОЧ с предельно низким уровнем нестабильности.

2. Концепция фемтосекундного синтезатора частот

Взятая нами за основу концепция фемтосекундного синтезатора частот для мобильных ФОЧ проиллюстрирована на рис. 1.

Задающий фемтосекундный эрбиевый волоконный лазер генерирует гребенку эквидистантных оптических частот шириной в несколько десятков нанометров вблизи 1560 нм. После усиления мощности фемтосекундного излучения с помощью эрбиевого волоконно-оптического усилителя в специально высоконелинейном волокне (ВНЛВ) происходит многократное уширение данной гребенки за счет различных нелинейных эффектов (фазовая самомодуляция, четырех-волновое смешение и др. [15]). Частота каждой линии гребенки в принципе может быть детерминирована (с точностью до фазы), т. к. она определяется двумя конкретными параметрами – фундаментальной частотой следования импульсов задающего лазера (межмодовой частотой) f_{rep} и так называемой частотой смещения гребенки f_{offset} [1–3]. Первый параметр регулируется изменением оптической длины резонатора задающего лазера, второй – изменением внутрирезонаторной дисперсии [16].

Для прецизионного синтеза частот необходимо соотнести («привязать») тем или иным способом указанную

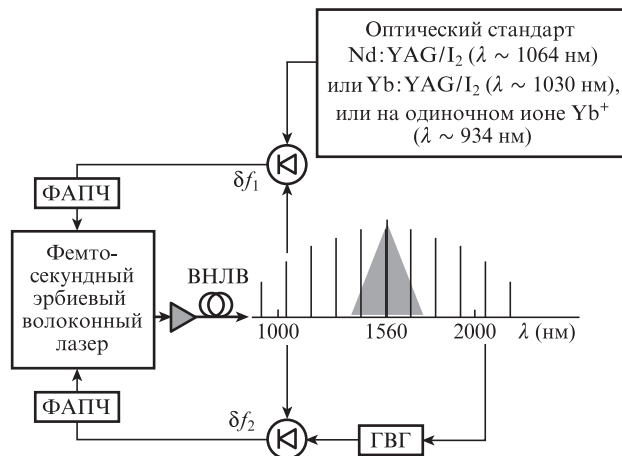


Рис. 1. Структура и принцип стабилизации фемтосекундного синтезатора частот для мобильных ФОЧ:

ВНЛВ – высоконелинейное волокно; ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты; ГВГ – генератор второй гармоники; δf_1 – радиочастотный сигнал биений (разностная частота) между репером оптического стандарта частоты и ближайшей коротковолновой компонентой фемтосекундной гребенки оптических частот; δf_2 – радиочастотный сигнал биений (разностная частота) между репером оптического стандарта частоты и соответствующей ему второй гармоникой длинноволновой компоненты фемтосекундной гребенки оптических частот. (Возможен вариант $\delta f_2 = f_{\text{offset}}$, когда удвоенные по частоте длинноволновые компоненты гребенки оптических частот смешиваются с коротковолновыми компонентами с помощью « $f-2f$ -интерферометра».)

фемтосекундную гребенку оптических частот с тем или иным оптическим стандартом частоты. При реализации мобильных ФОЧ таким стандартом может служить вторичный оптический стандарт частоты на основе стабилизированного по молекулярному иоду Nd:YAG- [17] или Yb:YAG-лазера [18] с удвоением частоты, разработанный в ИЛФ СО РАН. Такой стандарт частоты наилучшим образом подходит для реализации прецизионных мобильных фемтосекундных метрологических систем, поскольку он очень компактен, надежен и энергоэффективен. Предельно узкие нелинейные резонансы насыщенного поглощения на компонентах сверхтонкой структуры молекулярного иода (запрещенные дипольные переходы вблизи $\lambda = 532$ и 515 нм) позволяют минимизировать долговременную нестабильность частоты до уровня $\sim 10^{-15}$ [19]. Nd:YAG/I₂- и Yb:YAG/I₂-стандарты предоставляют сразу по два оптических репера – на основной длине волны генерации лазеров (~ 1064 и ~ 1030 нм соответственно) и на длине волны второй гармоники, отвечающей часовому переходу (~ 532 и ~ 515 нм соответственно).

Такая особенность указанных стандартов в принципе позволяет реализовывать несколько вариантов фемтосекундных синтезаторов частоты, различающихся способом соотнесения (привязки) гребенки оптических частот со стандартом частоты. Для создания мобильных ФОЧ на основе фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера наиболее оптимальным представляется вариант с использованием лишь длинноволнового репера оптического стандарта частоты (рис. 1). Ближайшая коротковолновая компонента фемтосекундной гребенки частот привязывается по фазе к длинноволновому реперу применяемого стандарта (реализуется фазовая автоподстройка частоты выделенной линии гребенки к частоте линии стандарта). Полная стабилизация всех компонент гребенки может быть достигнута далее двумя способами: путем детектиро-

вания с помощью нелинейного интерферометра (« $f-2f$ -интерферометра», как в работах [10–12]) и последующей фазовой привязки частоты смещения f_{offset} к опорной радиочастоте, генерируемой самим синтезатором либо непосредственно путем фазовой привязки второй гармоники длинноволновой компоненты фемтосекундной гребенки частот к длинноволновому реперу оптического стандарта. Второй способ проще конструктивно, т. к. не требует применения прецизионно юстируемой нелинейной интерферометрической схемы, однако для его реализации необходимы достаточно высокие интенсивность и когерентность выделенной длинноволновой компоненты гребенки. Таким образом, предложенная концепция обеспечивает гибкость конфигурации синтезатора. Кроме того, синтезируемая фемтосекундная гребенка частот может быть соотнесена и с другими, перспективными оптическими стандартами частоты ближнего ИК диапазона, например с разрабатываемым в ИЛФ СО РАН стандартом на основе одиночного иона Yb^+ , часового лазера в котором работает на длине волны ~ 934 нм (коротковолновый край уширенной фемтосекундной гребенки частот) [20]. Прогнозируемая долговременная нестабильность частоты этого стандарта составляет $\sim 10^{-17}$ [21].

Основная сложность задачи, связанной с реализацией предложенного типа синтезатора заключается в необходимости значительного уширения фемтосекундной гребенки частот – до перекрытия октавного диапазона оптических частот. Гребенка должна перекрывать (с запасом) интервал длин волн 1000–2000 нм. При этом на краях такого спектрального суперконтинуума должны быть обеспечены относительно высокие интенсивность и когерентность спектральных компонент, достаточные для уверенного детектирования радиочастотных биений этих компонент с длинноволновым репером используемого оптического стандарта частоты. Для максимальной эффективности работы цифровой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) отношение сигнал/шум в радиочастотном спектре биений, как правило, не должно быть менее 25 дБ (в полосе 100 кГц). Задача осложняется также специфическими ограничениями на массогабаритные и энергетические характеристики мобильной системы (необходимо обеспечить работоспособность системы при невысокой оптической мощности, характерной для эрбиевых волоконных фемтосекундных лазеров, без использования мощных усилителей).

Таким образом, основными этапами наших исследований являлись разработка специального ВНЛВ, с помощью которого решалась задача создания работоспособного прототипа синтезатора, разработка систем для активной стабилизации этого синтезатора и определение его отдельных характеристик с точки зрения возможности переноса стабильности оптических стандартов частоты в радиодиапазон.

3. Гибридное ВНЛВ

Спектральное уширение или генерация суперконтинуума в оптических ВНЛВ, как правило, связывается с эффективностью керровской нелинейности. При этом степень уширения, вообще говоря, определяется не только нелинейными эффектами, но и дисперсионными свойствами оптического волокна. Так, один из режимов генерации спектрального суперконтинуума реализуется в области аномальной дисперсии и связан с образованием со-

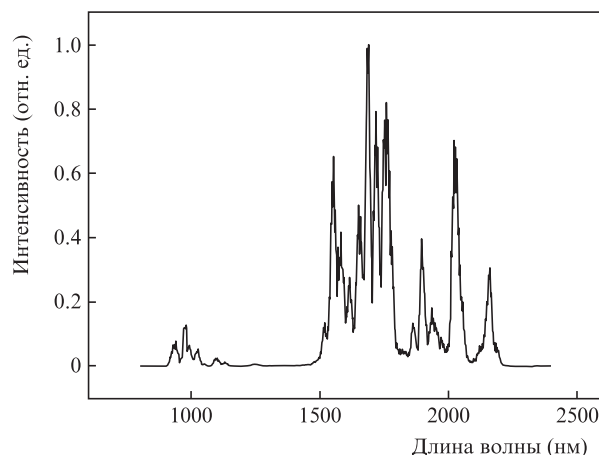


Рис.2. Спектр суперконтинуума в ВНЛВ длиной ~ 5 м. Нелинейный параметр волокна $\gamma = 10 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, дисперсионный параметр $D = 0.67 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ для $\lambda = 1560$ нм (центральная длина волны излучения накачки), средняя мощность излучения $P \approx 145$ мВт, длительность импульсов $t_0 \approx 150$ фс.

литонов высокого порядка [22]. Для эволюции импульса в этом режиме характерна сложная динамика: солитоны могут разбиваться на несколько отдельных компонентов, усиливаются эффекты саморассеяния вплоть до образования рамановских солитонов [23]. Квантовая природа эффекта Рамана и нестабильность, вызванная усилением шумов в области аномальной дисперсии [24, 25], предполагают низкую спектральную когерентность. Реализация этого сценария возможна только в том случае, если длина оптического ВНЛВ заметно превышает дисперсионную длину. Последняя при характерных для нашей задачи условиях (фемтосекундная длительность импульсов, $\lambda \sim 1560$ нм, кварцевое волокно) может составлять от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. На рис.2 показан экспериментальный спектр излучения эрбиевого лазера, уширенный в ВНЛВ длиной ~ 5 м с аномальной дисперсией на центральной длине волны излучения накачки (параметры использованного волокна и излучения накачки приведены в подписи к рисунку). Хорошо видна асимметрия спектра относительно центральной длины волны, вызванная рамановским саморассеянием: в длинноволновой части спектра содержится больше мощности, чем в коротковолновой.

Другой режим генерации спектрального суперконтинуума – классическое спектральное уширение за счет нелинейных эффектов и в первую очередь за счет фазовой самомодуляции (ФСМ). Такой режим реализуется в областях как аномальной, так и нормальной дисперсии, при этом именно дисперсионные характеристики волокна во многом определяют форму спектра и диапазон уширения [26].

Генерация суперконтинуума шириной в октаву – не единственное условие для получения требуемых радиочастотных биений между репером оптического стандарта частоты и фемтосекундной гребенкой оптических частот. Необходимость минимизации шумов (в том числе рамановских) накладывает ограничение на длину уширяющего спектр нелинейного волокна. В подобных экспериментах биения с удовлетворительным отношением сигнал/шум удавалось получить для суперконтинуумов, уширенных в ВНЛВ с длиной много меньше одного метра [11, 27] или около метра [28, 29]. В настоящей работе рассматривается система для генерации спектрального суперконтинуума на основе эрбиевого волоконного лазера со следующими ха-

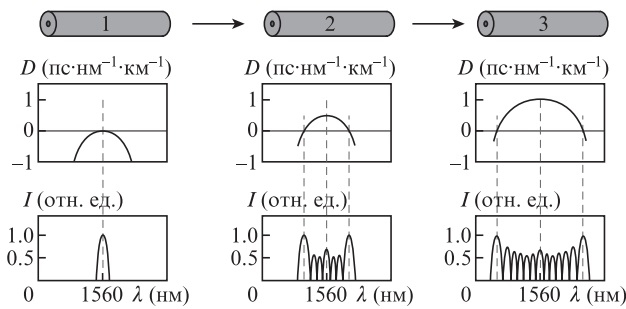


Рис.3. Концепция гибридного ВНЛВ: изменение дисперсионного профиля волокна и эволюция спектра ультракороткого импульса от сегмента 1 к сегменту 3.

раактеристиками: средняя мощность $P \sim 100\text{--}200$ мВт, длительность импульсов $t_0 \sim 100\text{--}200$ фс, частота их следования ~ 100 МГц. Используются ВНЛВ, легированные оксидом германия, с нелинейным параметром $\gamma = 10 \text{ Вт}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ и хроматической дисперсией $-0.6\text{--}0.7 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ на длине волны $\lambda = 1560$ нм; дисперсия варьируется в зависимости от диаметра сердцевины волокна (внешний диаметр волокна 110–122 мкм). Для подобной системы теоретическая оценка минимальной длины ВНЛВ, на которой возможно октавное уширение спектра за счет ФСМ, дает десятки сантиметров при условии, что хроматическая дисперсия отсутствует. Однако ширина экспериментальных спектров, например для 50-сантиметровых ВНЛВ с указанным параметром нелинейности, значительно меньше. Поскольку причиной этого различия является воздействие хроматической дисперсии, увеличения эффективности спектрального уширения можно добиться, управляя дисперсионным профилем волокна. Удачным примером такой оптимизации могут служить ВНЛВ с переменной дисперсией [30], однако характерная длина, на которой происходят существенные изменения дисперсии, в подобных волокнах составляет десятки метров, что на один-два порядка больше оптимальной для нашей задачи длины ВНЛВ. Для решения этой проблемы были исследованы гибридные ВНЛВ [31, 32], состоящие из двух или более сегментов с разными профилями дисперсии. Принцип построения такого волокна показан на рис.3. Гибридное волокно предоставляет широкие возможности по управлению дисперсионными параметрами на малых длинах – до 1 м.

Поиск оптимальных для получения максимальной ширины спектрального суперконтинуума дисперсионных параметров гибридных ВНЛВ проводился путем численного моделирования. Эволюция отдельного импульса рассчитывалась с помощью нелинейного уравнения Шредингера и метода расщепления по физическим параметрам [15]. Были найдены схемы соединения и дисперсионные профили отдельных сегментов гибридного волокна [32], которые могут обеспечить эффективную генерацию суперконтинуума в области $\sim 900\text{--}2200$ нм. Перекрытие этого спектрального диапазона необходимо для привязки фемтосекундной гребенки оптических частот к реперам оптических стандартов.

На рис.4 представлены результаты экспериментов для цельного волокна и гибридного волокна, состоящего из двух сегментов (соответствующих сегментам 1 и 2 на рис.3). Параметры первого сегмента гибридного волокна идентичны параметрам цельного волокна, поэтому начало эволюции импульсов в обоих волокнах одинаковое.

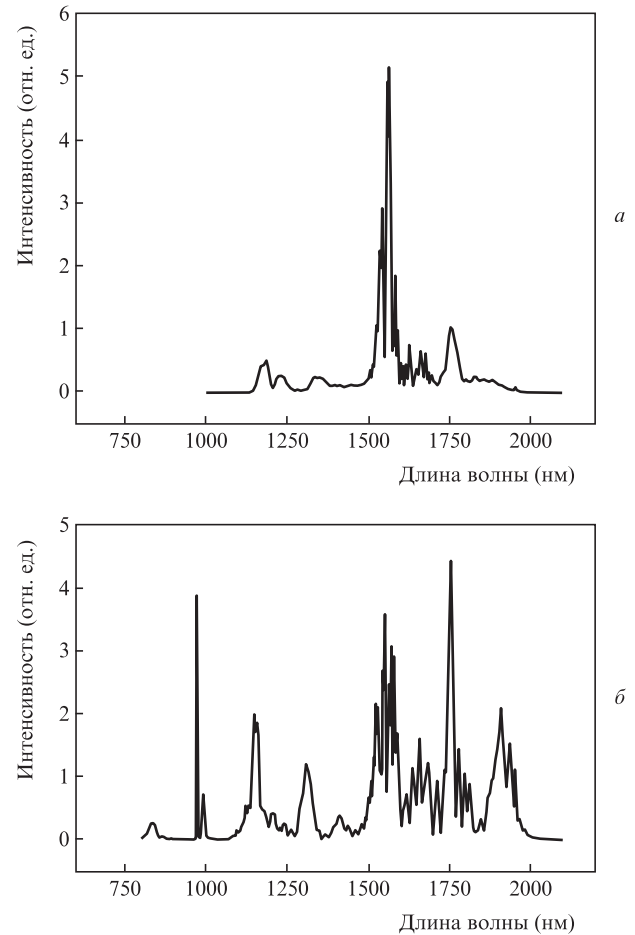


Рис.4. Генерация суперконтинуума в ВНЛВ длиной менее 1 м ($\gamma = 10 \text{ Вт}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$, $\lambda = 1560$ нм, $P \approx 140$ мВт, $t_0 \approx 150$ фс): спектры, уширенные в цельном волокне длиной 50 см (дисперсионный параметр $D = -0.54 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$) (а) и в гибридном волокне, состоящем из двух сегментов длиной 30 и 50 см ($D = -0.54$ и $0.67 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ соответственно) (б).

Центральная длина волны лежит в области малой по абсолютной величине нормальной дисперсии, что обеспечивает доминирование ФСМ над дисперсией, а значит и эффективное спектральное уширение. По мере распространения импульса спектральные крылья оказываются в областях с растущими абсолютными значениями дисперсии, и спектральное уширение ослабевает. Дисперсионный профиль второго сегмента гибридного волокна близок к параболическому: центральная длина волны лежит в области аномальной дисперсии и две нулевые точки профиля приближены к крыльям спектра. Преимущество такой конфигурации гибридного волокна состоит в том, что изменение его дисперсионного профиля от сегмента к сегменту учитывает эволюцию спектра импульса (рис.3), и по мере его распространения перекачка энергии из центральной области спектра на периферию не ограничивается негативным влиянием дисперсии. Сравнение уширенных спектров убедительно демонстрирует преимущества гибридных волокон: при длине уширяющего ВНЛВ менее одного метра суперконтинуум занимает требуемый диапазон (1000–2000 нм).

Использованные в работе гибридные волокна были изготовлены совместно с НЦВО РАН по технологии MCVD. Сегменты волокна были состыкованы путем сплавления

с помощью лабораторного сварочного аппарата Fujikura FSM-100P. Оптические потери в месте сварки составили менее 0,1 дБ.

4. Система стабилизации синтезатора

Схема экспериментальной установки, созданной для исследования предельно достижимой частотной стабильности разрабатываемого фемтосекундного синтезатора, представлена на рис.5.

В качестве задающего фемтосекундного лазера в синтезаторе для мобильных ФОЧ используется волоконный эрбиевый лазер с пассивной синхронизацией мод. Лазер имеет гибридную линейно-кольцевую конфигурацию резонатора, подобную предложенной нами ранее в работе [33]. Режим синхронизации мод в лазере реализуется за счет эффекта нелинейной эволюции поляризации [34]. Резонатор лазера состоит из двух частей: цельноволокновой кольцевой части и короткого линейного участка с несколькими объемными оптическими элементами. Контроль длины резонатора осуществляется с помощью пьезокерамических трансляторов 2, перемещающих зеркала в линейной части резонатора. Основные характеристики излучения задающего лазера таковы: центральная длина волны ~ 1560 нм, ширина спектра ~ 30 нм, длительность импульсов ~ 150 фс, частота их следования ~ 100 МГц, средняя выходная мощность ~ 15 мВт. Накачка фемтосекундного лазера осуществляется диодным лазером с волоконным выводом излучения на длине волны 976 нм мощностью ~ 400 мВт.

Лазер был дополнен волоконно-оптическим усилителем мощности 4, созданным совместно с ИАиЭ СО РАН. Усилитель выполнен по классической схеме EDFA [35] на основе волокна, легированного эрбием (волокно nLight Liekki Er80-8/125), накачка которого осуществляется в попутном направлении на длине волны ~ 980 нм. Непоглощенное излучение накачки возвращается в усилитель благодаря волоконной брэгговской решетке 5, записанной в выходном световоде усилителя. Волоконно-оптический тракт между задающим фемтосекундным лазером и гибридным ВНЛВ 7 содержит также отрезок компенсирующей дисперсию волокна (Corning MetroCor), длина которого подобрана экспериментально такой, чтобы обеспечить оптимальную для спектрального уширения длительность

импульсов на входе волокна 7. Средняя мощность излучения на выходе усилителя достигает ~ 200 мВт.

Излучение уширенной до октавы гребенки оптических частот попадает в спектрально-селективный волоконно-оптический смеситель, с помощью которого осуществляется смешение частот излучения длинноволнового ($\lambda \sim 1064$ нм) репера Nd:YAG/I₂-стандарта и ближайшей коротковолновой компоненты гребенки оптических частот. Смеситель состоит из сплавного волоконного ответвителя 8, спектрального мультиплексора 9 и интерференционного фильтра 10. На выходе смесителя посредством фотодиода детектируется радиочастотный сигнал биений с частотой δf_1 (разностная частота). Эта частота может принимать значения от нуля до $f_{\text{греб}}/2$ и определяется параметрами резонатора задающего фемтосекундного лазера (оптической длиной и дисперсией).

Коротковолновая компонента гребенки оптических частот стабилизируется относительно частоты оптического стандарта путем фазовой автоподстройки частоты δf_1 . Основным элементом электронной системы ФАПЧ является цифровой фазочастотный детектор (ФЧД) 15. В ФЧД происходит сравнение по частоте и фазе двух радиочастотных сигналов – опорного и стабилизируемого. В качестве опорного в данном эксперименте используется сигнал от промышленного водородного стандарта частоты 14 (модель Ч1-75) с относительной нестабильностью 10^{-14} за 100 с. При рассогласовании частот входных сигналов на выходе детектора формируется сигнал ошибки. Этот сигнал после фильтрации и усиления поступает на исполнительные устройства, подстраивающие частоту (и фазу) стабилизируемого сигнала. Перечисленные элементы вместе образуют контур ФАПЧ. С помощью соответствующих фильтров и усилителей (интеграторов), установленных на выходе ФЧД, формируются две петли обратной связи – медленная и быстрая. Исполнительным устройством для медленной петли служит пьезокерамический пакет с большим рабочим ходом, который, перемещая промежуточное зеркало, компенсирует медленные дрейфы оптической частоты (вызванные тепловыми и механическими релаксационными процессами в элементах резонатора лазера). Максимальная чувствительность данного регулятора равна ~ 1 МГц/В. Эффективная полоса отработки возмущений с помощью медленной петли составляет менее 100 Гц, при этом ширина диапазона пере-

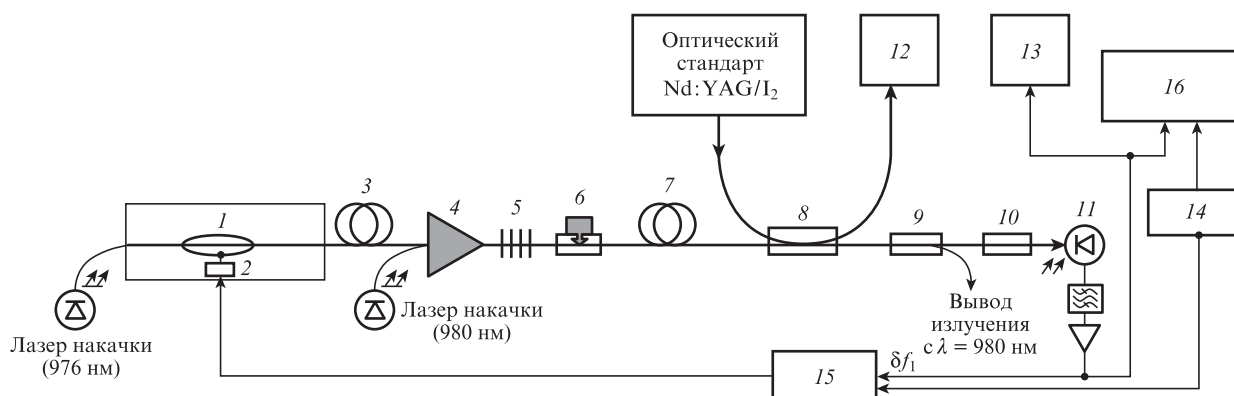


Рис.5. Схема экспериментальной установки для измерения вносимой синтезатором частотной нестабильности при реализации ФОЧ: 1 – фемтосекундный эрбиевый волоконный лазер; 2 – пьезотранслятор; 3 – компенсирующее дисперсию волокно; 4 – эрбиевый волоконно-оптический усилитель; 5 – волоконная брэгговская решетка на $\lambda = 980$ нм; 6 – контроллер поляризации; 7 – гибридное ВНЛВ; 8 – сплавной волоконный ответвитель; 9 – спектральный мультиплексор; 10 – интерференционный фильтр; 11 – фотодиод; 12 – оптический анализатор спектра; 13 – радиочастотный анализатор спектра; 14 – водородный стандарт частоты; 15 – фазочастотный детектор; 16 – частотомер.

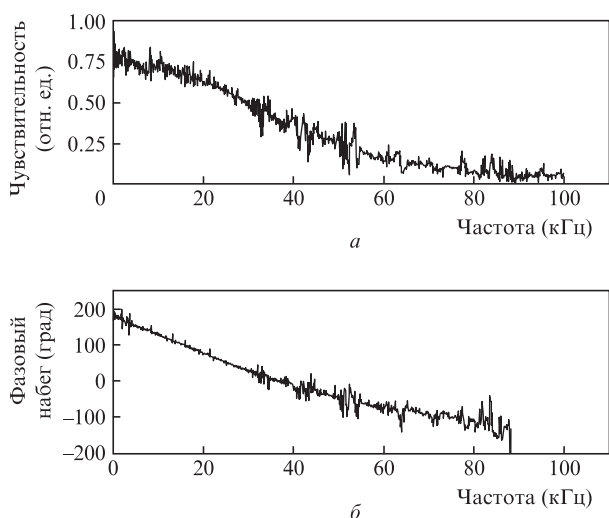


Рис.6. Частотные характеристики пьезотранслятора в быстрой петле контура ФАПЧ.

стройки оптической частоты значительно превышает $f_{гер}$, что позволяет компенсировать уходы частоты в течение продолжительного времени даже без применения термостабилизации резонатора лазера. Для отработки быстрых возмущений и осуществления фазового захвата частоты δf_1 , а следовательно и полноценной стабилизации частоты коротковолновой компоненты гребенки оптических частот относительно оптического стандарта, используется «быстрая» пьезокерамика с малым ходом и высокой резонансной частотой (более 100 кГц). Для реализации максимальной полосы отработки с помощью данной керамики была разработана массивная низкодобротная конструкция из бронзового сплава (монокристаллическая стойка), на которую без образования каких-либо консолей приклеивается керамика с миниатюрным зеркалом, ограничивающим линейную часть резонатора. В итоге максимальная эффективная полоса отработки в контуре ФАПЧ с быстрой керамикой достигает ~ 30 кГц и ограничивается главным образом снижением чувствительности и чрезмерно большим фазовым набегом на высоких частотах (см. измеренные частотные характеристики на рис.6). Максимальная чувствительность быстрого пьезотранслятора составляет ~ 50 кГц/В.

Блок разработанного ФЧД построен на основе цифровых элементов: входного компаратора (микросхема AD96685), счетчика-делителя (МС10Н131М) и собственно микросхемы с функцией ФЧД (AD9901). Кроме того, в выходной цепи содержатся фильтры и усилители, формирующие надлежащую амплитудно-частотную характеристику петель обратной связи. Быстродействие применяемых современных цифровых элементов позволяет обеспечить широкую полосу отработки системы ФАПЧ, не прибегая к аналоговым смесителям или гибридным аналого-цифровым ФЧД [36].

Для исключения возможности выхода за границу диапазона перемещения пьезотранслятора и обеспечения возможности неограниченного времени работы системы ФАПЧ дополнительно была реализована система термостабилизации резонатора задающего волоконного фемтосекундного лазера, поддерживающая установленную температуру лазера (в термостатированном боксе) с точностью до 0.1°C .

5. Результаты измерений и обсуждения

Одной из основных целей нашего исследования являлось измерение характеристик, ограничивающих стабильность прототипа мобильного фемтосекундного синтезатора при реализации ФОЧ. Нами определялась случайная погрешность частоты, характеризующая эффективность системы активной стабилизации синтезатора, относительно частоты оптического стандарта (относительная частотная нестабильность, выраженная через параметр Аллана), т.е. устанавливались предельные возможности системы по переносу стабильности и точности оптического стандарта на синтезируемые частоты.

Для первоначальной настройки и запуска системы ФАПЧ проводилось измерение радиочастотного спектра сигнала биений (δf_1) между опорной частотой оптического стандарта (Nd:YAG/I₂) и ближайшей ($\lambda \sim 1064$ нм) оптической частотой синтезатора. Для этого использовался широкополосный радиочастотный анализатор спектра RODE&SCHWARZ FSP, на вход которого подавался сигнал с выхода фотодиода, используемого в волоконно-оптическом спектрально-селективном смесителе. При настройке синтезатора основное внимание уделялось таким ключевым параметрами спектра сигнала биений, как ширина и форма линии, скорость частотного дрейфа, отношение сигнал/шум. Результаты измерений радиочастотного спектра биений между частотой опорного оптического стандарта и ближайшей оптической частотой синтезатора в свободном режиме и в режиме работающей ФАПЧ приведены на рис.7.

Результаты этих измерений показали, что в свободном режиме работы синтезатора сигнал биений испытывает очень сильные частотные возмущения – радиочастотный спектр сигнала уширен акустическим джиттером до ~ 1 МГц и, как следствие, имеет неправильную (нелоренцевскую) форму (кривая 1 на рис.7). Кроме того, наблюдается сильный частотный дрейф со скоростью до 0.5 МГц/с, обусловленный тепловыми и механическими релаксационными процессами в резонаторе задающего фемтосекундного лазера синтезатора. Тем не менее отношение сигнал/шум для биений (определяемое как отношение максимальной мощности сигнала к шумовому порогу) достигает примерно 30 дБ, что является достаточным для уверенной работы блоков ФАПЧ в синтезаторе. Включение ФАПЧ эффективно стабилизирует частоту биений, о чем свидетельствует радиочастотный спектр (кривая 2 на

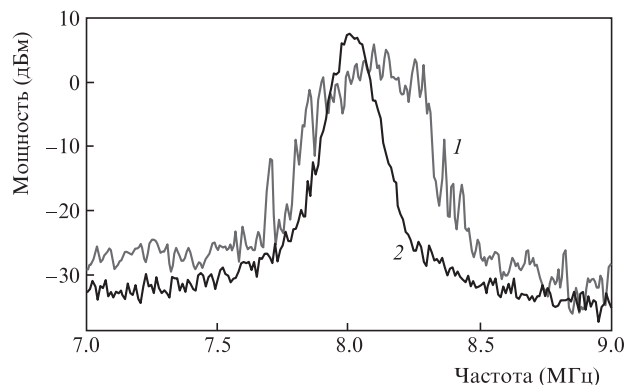


Рис.7. Радиочастотные спектры сигнала биений δf_1 в свободном режиме синтезатора, когда система ФАПЧ не активна (1), и при включенной системе ФАПЧ (2). Разрешение анализатора 10 кГц.

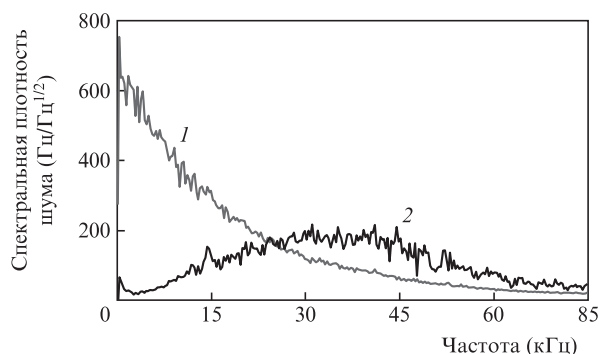


Рис.8. Спектры шумов на выходе частотного детектора в свободном режиме синтезатора, когда система ФАПЧ не активна (1), и при включенной системе ФАПЧ (2).

рис.7). Ширина линии уменьшается до нескольких кГц. Сама линия приобретает более правильную (близкую к лоренцевской) форму, частотный дрейф прекращается (отрабатывается медленной петлей ФАПЧ). Кроме того, для качественной оценки эффективности работы системы ФАПЧ также измерялся спектр шумов на выходе дополнительного частотного детектора (рис.8). Для этого использовался аналого-цифровой преобразователь, подключенный к компьютеру, выполняющему быстрое фурье-преобразование сигнала. Таким образом визуализировалась качественная картина спектрального распределения амплитуды частотно-фазовых возмущений в синтезаторе. Как видно из предварительно полученных данных, в режиме фазового захвата (кривая 2 на рис.8) происходит подавление шумов в полосе частот до ~ 25 кГц. В дальнейшем полоса была расширена до ~ 30 кГц.

На заключительном этапе предварительных исследований проводилось долговременное прецизионное измерение частоты сигнала биений δf_1 (разностной частоты между частотой опорного оптического стандарта и ближайшей оптической частотой синтезатора) в режиме фазовой привязки (включенной системы ФАПЧ). Измерение выполнялось с помощью прецизионного частотомера Pendulum CNT-91, на опорный вход которого подавался сигнал от того же водородного стандарта частоты, что и на опорный вход ФЧД. Поверенная относительная случайная погрешность измерения радиочастоты данным частотомером позволяет измерять долговременную нестабильность радиочастоты мегагерцевого диапазона на уровне $\sim 10^{-13}$ (за времена усреднения не менее 100 с).

В результате были измерены абсолютные значения частоты сигнала биений в течение времени, превышающего 5000 с (время единичного измерения 1 с) (рис.9). С использованием специализированной компьютерной программы AlaVar 5.0 рассчитан параметр Аллана (стандартное отклонение Аллана) для относительных случайных

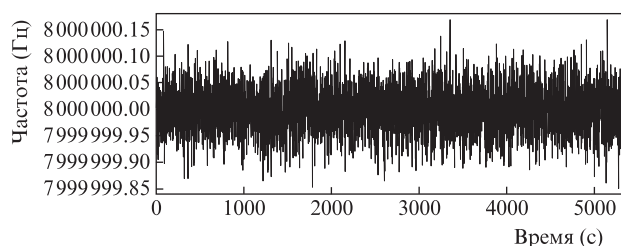


Рис.9. Временная зависимость абсолютных значений частоты сигнала биений δf_1 (время единичного измерения 1 с).

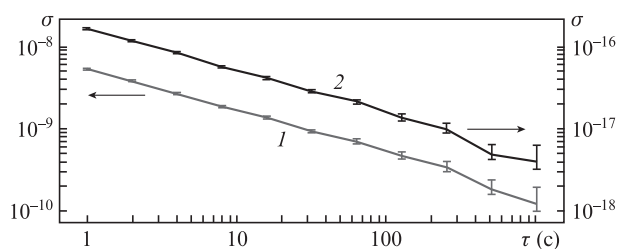


Рис.10. Параметр Аллана для относительных случайных отклонений радиочастотного сигнала биений δf_1 от опорной радиочастоты (1) и для относительных случайных отклонений оптической частоты синтезатора от частоты опорного оптического стандарта, к которому осуществляется фазовая привязка данной оптической частоты синтезатора (2).

отклонений от опорной радиочастоты (8.0 МГц) и построена его временная зависимость (кривая 1 на рис.10). Из полученных данных следует, что относительная нестабильность радиочастоты сигнала биений δf_1 не превышает $\sim 5.4 \times 10^{-10}$ за 100 с, $\sim 1.9 \times 10^{-10}$ за 500 с и $\sim 1.2 \times 10^{-10}$ за 1000 с.

Нестабильность собственно оптической частоты синтезатора (составляющей $\sim 2.82 \times 10^{14}$ Гц) складывается из ее случайных отклонений от частоты опорного оптического стандарта, за которой ближайшая компонента фемтосекундной гребенки частот должна следовать по фазе с заданным постоянным смещением (равным в данном случае 8.0 МГц), и из нестабильности частоты самого оптического стандарта. Точность следования по фазе за опорным сигналом (стабильность частоты биений) и определяется качеством работы системы ФАПЧ, т.е. ее собственной погрешностью. Пересчет параметра Аллана для относительных случайных отклонений ближайшей оптической частоты синтезатора от частоты опорного оптического стандарта (к которому и осуществляется фазовая привязка) дает значения, соответствующие кривой 2 на рис.10: $\sim 1.7 \times 10^{-17}$ за 100 с, $\sim 5.1 \times 10^{-18}$ за 500 с и $\sim 4.0 \times 10^{-18}$ за 1000 с. Эти величины и характеризуют относительную случайную погрешность, вносимую системой ФАПЧ синтезатора при привязке его частоты к частоте оптического стандарта.

Таким образом, разработанная система ФАПЧ синтезатора в принципе способна обеспечить перенос долговременной стабильности всех доступных на сегодняшний день оптических стандартов частоты на синтезируемые частоты оптического диапазона и радиодиапазона без ее ухудшения. В дальнейшем для реализации полнофункционального макета мобильного фемтосекундного синтезатора и ФОЧ на его основе экспериментальная установка будет дополнена вторым контуром ФАПЧ для стабилизации по оптическому стандарту и длинноволнового края гребенки оптических частот (см. рис.1). Окончательные результаты будут предметом отдельной публикации.

6. Заключение

Проведено предварительное экспериментальное исследование прототипа компактного фемтосекундного синтезатора частот, создаваемого на основе фемтосекундной волоконной эрбиевой лазерной системы. В синтезаторе используется специально разработанное гибридное ВНЛВ, обеспечивающее эффективную генерацию октавной гребенки оптических частот с относительно высокими интенсивностью и когерентностью на краях спектра даже

при умеренной мощности фемтосекундного излучения и малой (дециметровой) длине волокна. Продемонстрировано, что разработанные для синтезатора системы ФАПЧ могут обеспечить перенос долговременной стабильности оптических стандартов частоты на синтезируемые частоты. При этом минимально достижимая частотная нестабильность может составлять $\sim 10^{-17}$ (за времена усреднения не менее 100 с).

Компактность, надежность стабилизации и работоспособность при относительно малой мощности оптических сигналов (когда не требуются дополнительные усилители и мощные источники накачки) делают представленную лазерную систему – синтезатор – перспективным кандидатом для реализации на ее основе мобильных вариантов ФОЧ.

Авторы выражают признательность А.А.Сысолятину и А.А.Луговому за помощь при выполнении настоящей работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» (проект № 5.2) и гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-4096.2014.2 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Фемтосекундный лазерный комплекс».

- Diddams S.A., Udem Th., Bergquist J.C., Curtis E.A., Drullinger R.E., Hollberg L., Itano W.M., Lee W.D., Oates C.W., Vogel K.R., Wineland D.J. *Science*, **293**, 825 (2001).
- Bagayev S.N., Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F. *Laser Phys.*, **14**, 1367 (2004).
- Ye J., Cundiff S.T. (Eds) *Femtosecond Optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application* (New York: Springer, 2005).
- Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Shelkovnikov A.S., Tausenev A.V., Tyurikov D.A. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
- Cundiff S.T., Ye J., Hall J.L. *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 3749 (2001).
- Holzwarth R., Reichert J., Udem T., Hänsch T.W. *Laser Phys.*, **11**, 1100 (2001).
- Kim K., Washburn B.R., Wilpers G., Oates C.W., Hollberg L., Newbury N.R., Diddams S.A., Nicholson J.W., Yan M.F. *Opt. Lett.*, **30**, 932 (2005).
- Meyer S.A., Squier J.A., Diddams S.A. *Eur. Phys. J. D*, **48**, 19 (2008).
- Moudrak A., Klein H., Eisfeller B. *Inside GNSS*, **3**, 45 (2008).
- Adler F., Moutzouris K., Leitenstorfer A., Schnatz H., Lipphardt B., Grosche G., Tauser F. *Opt. Express*, **12**, 5872 (2004).
- Washburn B.R., Diddams S.A., Newbury N.R., Nicholson J.W., Yan M.F., Jørgensen C.G. *Opt. Lett.*, **29**, 250 (2004).
- Washburn B.R., Fox R.W., Newbury N.R., Nicholson J.W., Feder K., Westbrook P.S., Jørgensen C.G. *Opt. Express*, **12**, 4999 (2004).
- Inaba H., Daimon Y., Hong F.L., Onae A., Minoshima K., Schibli T.R., Matsumoto H., Hirano M., Okuno T., Onishi M., Nakazawa M. *Opt. Express*, **14**, 5223 (2006).
- Gubin M.A., Киреев А.Н., Конященко А.В., Крюков П.Г., Таусенев А.В., Тюриков Д.А., Шелковников А.С. *Квантовая электроника*, **38**, 613 (2008).
- Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Acad. Press, 2007).
- Haverkamp N., Hundertmark H., Fallnich C., Telle H.R. *Appl. Phys. B*, **78**, 321 (2004).
- Скворцов М.Н., Охалкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н. *Квантовая электроника*, **34**, 1101 (2004).
- Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Kvashnin N.L., Bagayev S.N. *Opt. Commun.*, **256**, 347 (2005).
- Ye J., Robertsson L., Picard S., Ma L.-S., Hall J.L. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48**, 544 (1999).
- Chepurov S.V. *Techn. Dig. 6th Int. Symp. on Modern Problems of Laser Physics (MPLP-2013)* (Novosibirsk, Russia, B39, 2013).
- Huntemann N., Okhapkin M., Lipphardt B., Weyers S., Tamm Chr., Peik E. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 090801 (2012).
- Genty G., Coen S., Dudley J.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1771 (2007).
- Genty G., Lehtonen M., Ludvigsen H. *Opt. Express*, **12**, 4614 (2004).
- Nakazawa M., Tamura K.R., Kubota H., Yoshida E. *Opt. Fiber Technol.*, **4**, 215 (1998).
- Denisov V.I., Korel I.I. *Laser Phys.*, **16**, 507 (2006).
- Багаев С.Н., Денисов В.И., Дианов Е.М., Корель И.И., Кузнецов С.А., Пивцов В.С., Плотский А.Ю., Сенаторов А.К., Сысолятин А.А., Чепуров С.В. *ЖЭТФ*, **132**, 1011 (2007).
- Tauser F., Leitenstorfer A., Zinth W. *Opt. Express*, **11**, 594 (2003).
- Nicholson J.W., Yan M.F., Wisk P., Fleming J., DiMarcello F., Monberg E., Yablon A., Jørgensen C., Veng T. *Opt. Lett.*, **28**, 643 (2003).
- Nicholson J.W., Abeeluck A.K., Headley C., Yan M.F., Jørgensen C.G. *Appl. Phys. B*, **77**, 211 (2003).
- Finot C., Fatome J., Sysolyatin A., Kosolapov A., Wabnitz S. *Opt. Lett.*, **38**, 5361 (2013).
- Takashi H., Takayanagi J., Nishizawa N., Goto T. *Opt. Express*, **12**, 317 (2004).
- Корель И.И., Денисов В.И., Нюшков Б.Н., Пивцов В.С. *Труды МФТИ*, **6** (1), 7 (2014); Korel I.I., Nyushkov B.N., Denisov V.I., Pivtsov V.S., Koliada N.A., Sysolyatin A.A. *Techn. Dig. 6th Int. Symp. on Modern Problems of Laser Physics (MPLP-2013)* (Novosibirsk, Russia, p. 226, 2013).
- Денисов В.И., Иваненко А.В., Нюшков Б.Н., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **38**, 801 (2008).
- Nelson L.E., Jones D.J., Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. *Appl. Phys. B*, **65**, 277 (1997).
- Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology* (San Diego: Acad. Press, 1999).
- Беверини Н., Преведелли М., Соррентино Ф., Нюшков Б., Руффини А. *Квантовая электроника*, **34**, 559 (2004).