

Непрерывный фемтосекундный лазер на Er : волокне с диодной накачкой посредством рамановского конвертера

А.В.Таусенев, П.Г.Крюков

Создан и исследован фемтосекундный волоконный лазер на Er : волокне с накачкой на $\lambda = 1480$ нм от рамановского конвертера излучения иттербиевого лазера с диодной накачкой. Лазер способен работать в двух режимах – солитонном и растянутого импульса. Выходные параметры лазера: длина волны 1550 нм, длительность импульса менее 100 фс, частота следования импульсов 25 МГц, средняя мощность 10 мВт.

Ключевые слова: эрбиевое волокно, непрерывный фемтосекундный лазер, волоконный рамановский конвертер.

1. Введение

В настоящее время большой интерес проявляется к лазерам ультракоротких импульсов (УКИ) непрерывного действия. Связано это, в частности, с тем, что такие лазеры, испуская непрерывную последовательность импульсов, являются также источником непрерывных эквидистантно расположенных узких спектральных линий, интервал между которыми равен частоте следования импульсов в цуге, причем полная протяженность спектра определяется длительностью отдельного импульса, а ширина отдельной линии – стабильностью непрерывного режима. Иными словами, лазер УКИ непрерывного действия является не только источником УКИ, но и комб-генератором высокомонохроматичных оптических частот. Поэтому временная когерентность излучения такого лазера характеризуется двумя значениями: предельно малым, которое определяется длительностью УКИ, и предельно большим, которое определяется стабильностью непрерывного режима [1]. В современных фемтосекундных лазерах эти значения могут различаться на 15 порядков.

Такая уникальная особенность – сочетание свойств узкополосного лазера и лазера УКИ – лежит в основе двух исключительно важных применений непрерывных фемтосекундных лазеров. Первое – прецизионная метрология оптических частот. Здесь использование непрерывных фемтосекундных лазеров вызвало подлинную революцию [2–4]. Гребёнка оптических частот, по существу, представляет собой линейку с делениями, равными частоте следования фемтосекундных импульсов. Интервал между эквидистантно расположенными оптическими частотами можно привязать к микроволновому стандарту частоты и осуществить абсолютное измерение оптической частоты, лежащей между УФ и ИК границами видимого диапазона. Такое измерение оказалось возможным

А.В.Таусенев, П.Г.Крюков. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: tausenev@fo.gpi.ac.ru

Поступила в редакцию 15 марта 2003 г.

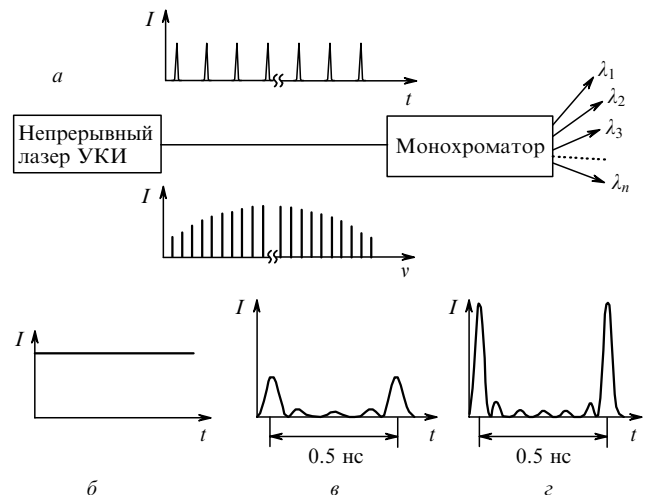


Рис.1. Принцип использования непрерывного лазера УКИ для мультиплексирования в системах ВОЛС.

провести без сложной цепочки промежуточных частот, используя фемтосекундный лазер на Ti : сапфире.

Второе важное применение непрерывных фемтосекундных лазеров – это использование их в системах волоконно-оптической связи (ВОЛС), где комб-генератор несущих частот является естественным средством реализации принципа WDM (мультиплексирование путем уплотнения по длинам волн). В системах WDM информация передается параллельно по многим каналам, разделенным по длинам волн, причем для каждой длины волны обычно используется отдельный лазер-передатчик. Как известно, существует также мультиплексирование путем временного уплотнения сигналов (TDM). Тот факт, что лазеры УКИ непрерывного действия являются источниками как непрерывных эквидистантно расположенных несущих частот, так и непрерывной последовательности импульсов, дает принципиальную возможность построения гибридных систем OTDM/WDM со скоростью передачи информации свыше 1 Тбит/с [5].

На рис.1,а показано, как с помощью подходящего монохроматора можно выделить отдельные моды непрерывного лазера УКИ. Если выделяется одна мода, то не-

сущая частота в соответствующем канале имеет постоянную амплитуду (рис.1,б). Если же выделить несколько мод, то возникает непрерывная последовательность импульсов с длительностью, определяемой шириной спектра выделенных мод, и периодом следования, определяемым межмодовым интервалом (рис.1,в и г). Для практической реализации принципа WDM интервал между каналами должен быть не менее 10 ГГц. Современные лазеры непрерывного действия (полупроводниковые и волоконные), работающие в режиме синхронизации мод, способны генерировать последовательность УКИ с частотой до 30 ГГц [6]. Таким образом, можно организовать каналы WDM с достаточно короткими импульсами, кодирующими информацию.

Хотя фемтосекундные лазеры на Ti : сапфире широко используются для генерации гребёнки оптических частот, они обладают рядом недостатков. Главный из них – необходимость иметь довольно дорогостоящий лазер накачки. Поэтому желательна разработка фемтосекундных лазеров других типов. Волоконные лазеры особенно привлекательны из-за компактности и относительно низкой стоимости. Кроме того, они работают в другой области длин волн. Имеется ряд работ, посвященных исследованиям волоконных лазеров, работающих в режиме синхронизации мод [7, 8].

В настоящей работе исследуется созданный нами лазер, в котором используется активированное ионами Er³⁺ одномодовое волокно, накачиваемое излучением волоконного иттербиевого лазера с диодной накачкой, преобразованного по частоте рамановским конвертером. Лазер генерирует непрерывную последовательность импульсов длительностью не более 100 фс на длине волны 1550 нм со средней мощностью до 10 мВт при накачке излучением с длиной волны 1.48 мкм.

2. Особенности режима самосинхронизации мод

В современных лазерах генерация УКИ происходит за счет самосинхронизации мод. Этот режим многомодовой генерации осуществляется благодаря амплитудной самомодуляции излучения, циркулирующего в резонаторе. Схема лазера УКИ непрерывного действия (рис.2) состоит из трех основных элементов, помещаемых в резонатор.

Первый элемент – активная среда с достаточно широкой полосой усиления и со стабильным уровнем накачки.

Второй элемент – устройство для амплитудной самомодуляции излучения, циркулирующего в резонаторе. Самомодуляция означает, что модуляция автоматически происходит с частотой обхода резонатора, т. е. с частотой межмодового интервала аксиальных мод. В современных лазерах такая самомодуляция основана на изменении показателя преломления в зависимости от интенсивности. Если при этом используется керровская нелинейность

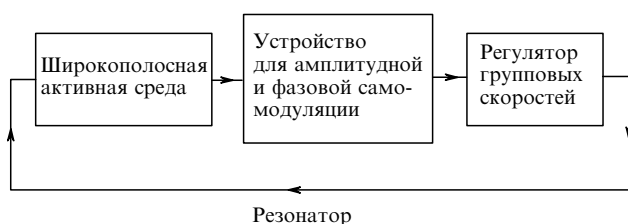


Рис.2. Схема лазера УКИ непрерывного действия.

(восприимчивость 3-го порядка $\chi^{(3)}$ за счет связанных электронов), то можно получить достаточно быстродействующую самомодуляцию, требуемую для генерации импульсов длительностью до нескольких фемтосекунд. Следует сказать, что такое зависимое от интенсивности изменение показателя преломления ведет к фазовой самомодуляции (ФСМ) – изменению фазы излучения и, следовательно, к изменению частоты. Значит, этот эффект может обеспечить генерацию новых частот, что крайне важно, т. к. при усилении происходит регенеративное сужение спектра. А для генерации УКИ нужно не только скомпенсировать такое сужение, но даже расширить спектр.

Третий элемент – регулятор дисперсии групповых скоростей (ДГС). Любое вещество, в том числе и активный элемент, обладает дисперсией. Поэтому циркулирующие в резонаторе импульсы испытывают ее воздействие, приводящее, в частности, к увеличению длительности (расплыванию) импульса, которое называется чирпированием. Для того чтобы скомпенсировать его, нужно ввести элемент с дисперсией противоположного знака. Кроме того, благодаря уширению спектра за счет ФСМ можно сократить длительность импульса подбором нужной ДГС. На этом принципе основана исключительно эффективная методика усиления чирпированных импульсов.

В отличие от фемтосекундных твердотельных лазеров на вибронных кристаллах, где элементы сосредоточены в определенных местах резонатора, разделенных воздушными промежутками, в волоконных лазерах они распределены по длине световодов, образующих резонатор. В указанных типах лазеров различен также механизм амплитудной самомодуляции, нужный для синхронизации мод. В твердотельных лазерах он основан на эффекте самофокусировки (керровская линза), а в волоконном лазере – на эффекте нелинейного двулучепреломления. На рис.3 показан принцип действия такого механизма амплитудной самомодуляции [9], основанного на нелинейном вращении поляризации. Волокно всегда имеет определенное двулучепреломление, в результате чего возникает эллиптическая поляризация излучения. Нелинейная связь между поперечными компонентами поля E_x и E_y за счет фазовой кросс-модуляции (ФКМ) приводит к вращению эллипса, которое зависит от интенсивности. В сочетании с поляризатором это вращение обеспечивает зависимость пропускания от интенсивности.

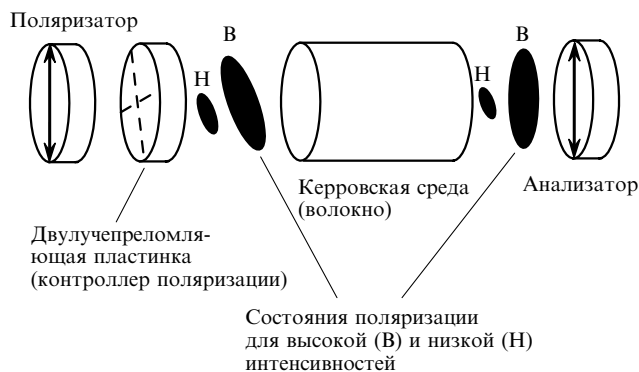


Рис.3. Принцип получения амплитудной самомодуляции в оптическом волокне [9].

3. Два режима работы волоконного лазера УКИ

Рассмотрим общую схему лазера, представленную на рис.4. Активная среда в виде отрезка одномодового волокна длиной 4.95 м, активированного ионами Er^{3+} , имеет коэффициент дисперсии групповых скоростей $\beta_2 = +0.0195 \text{ пс}^2/\text{м}$; диаметр поля моды и коэффициент поглощения на $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ равны 3.1 мкм и 15 дБ/м. Для накачки лазера на длине волны 1480 нм использовался рамановский конвертер [10] излучения непрерывного лазера на волокне, активированном ионами Yb^{3+} , с накачкой через оболочку излучением лазерных диодов 8 Вт на $\lambda = 980 \text{ нм}$. При выходной мощности лазерных диодов 8 Вт можно было получить излучение накачки с длиной волны 1480 нм мощностью до 2 Вт, которое заводилось в активное волокно через WDM-мультиплексор 1480/1550.

В качестве поляризатора использовался поляризационно-зависимый фарадеевский изолятор, который также обеспечивал однонаправленный режим работы кольцевого лазера.

Для получения нужной для генерации УКИ суммарной ДГС в резонатор добавлялся отрезок одномодового волокна SMF-28 длиной 3–6 м с диаметром сердцевинки $\sim 10 \text{ мкм}$, обладающий отрицательной ДГС ($\beta_2 = -0.022 \text{ пс}^2/\text{м}$ на длине волны 1550 нм).

Степень нужного двулучепреломления достигалась с помощью контроллеров поляризации, представляющих собой несколько витков волокна SMF-28, число которых и радиус изгиба обеспечивают определенную степень двулучепреломления. По существу, эти несколько витков эквивалентны двулучепреломляющей пластине. Конкретно для настройки режима самосинхронизации мод требуются две пластины $\lambda/4$ перед поляризатором и пластины $\lambda/2$ и $\lambda/4$ за ним. Вывод излучения из кольца осуществляется через ответвитель со степенью деления 20/80 на длине волны 1550 нм.

В принципе в подобных схемах существуют два режима генерации с самосинхронизацией мод [11]. Первый режим связан с формированием оптического солитона. Он возникает, когда отрицательная ДГС в волокне компенсируется ФСМ. Энергия фундаментального солитона, распространяющегося в световоде,

$$E_{\text{sol}} = \frac{|\beta_2|}{\gamma\tau}, \quad (1)$$

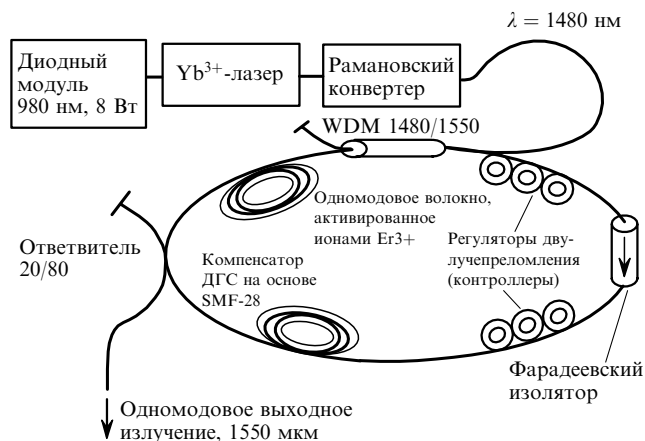


Рис.4. Схема волоконного лазера с самосинхронизацией мод.



Рис.5. Спектр генерации в солитонном режиме.

где β_2 – коэффициент ДГС; γ – коэффициент ФСМ, зависящий от нелинейного показателя преломления n_2 ; τ – длительность импульса с формой sech^2 . Солитонный режим в резонаторе волоконного лазера был реализован в работах [12, 13].

Главный недостаток этого режима заключается в том, что при стремлении получить предельно короткие импульсы с большей энергией режим генерации одиночного импульса на периоде переходит в режим нескольких импульсов. Это объясняется тем, что для заданных параметров резонатора солитон характеризуется вполне определенной формой (амплитудой и длительностью), а энергия солитона квантуется. При увеличении мощности накачки энергия импульса не увеличивается, но возникают дополнительные неконтролируемые (меньшие по интенсивности) импульсы на периоде следования и тем самым нарушается режим одиночного импульса.

Существует также другой недостаток. На рис.5 показан типичный спектр генерации в солитонном режиме, пики на спектре объясняются следующим образом. При распространении солитона в резонаторе он подвергается периодическим изменениям из-за усиления, фильтрации и потерь в местах сварок и на выходном ответвителе. В тот момент, когда импульс снова приобретает форму солитона, он теряет часть излучения. Теряемая солитоном часть излучения выглядит как протяженный пьедестал импульса и в спектральном диапазоне представляет собой узкий спектральный пик. Эти узкие пики располагаются по всему спектру импульсной генерации, их конфигурация зависит от длины резонатора, длительности импульса и дисперсии волокна. При увеличении длины резонатора, как и при уменьшении длительности импульса, происходит смещение пиков к центральной длине волны, что приводит к резонансной нестабильности, которая объясняется когерентным взаимодействием излучения солитона с излучением, сосредоточенным в пьедестале.

Чтобы получить одиночный импульс с большей энергией и меньшей длительностью, желательно избежать таких эффектов. Для этого можно реализовать другой режим, основанный на использовании больших значений ДГС, что приводит к сильному chirпированию импульса, распространяющегося по волокну резонатора. Распространение импульса по резонатору показано на рис.6. Происходит генерация импульса, сильно растянутого за счет chirпа, с последующим сжатием его в волокне с отрицательной ДГС. Такая операция с успехом используется в

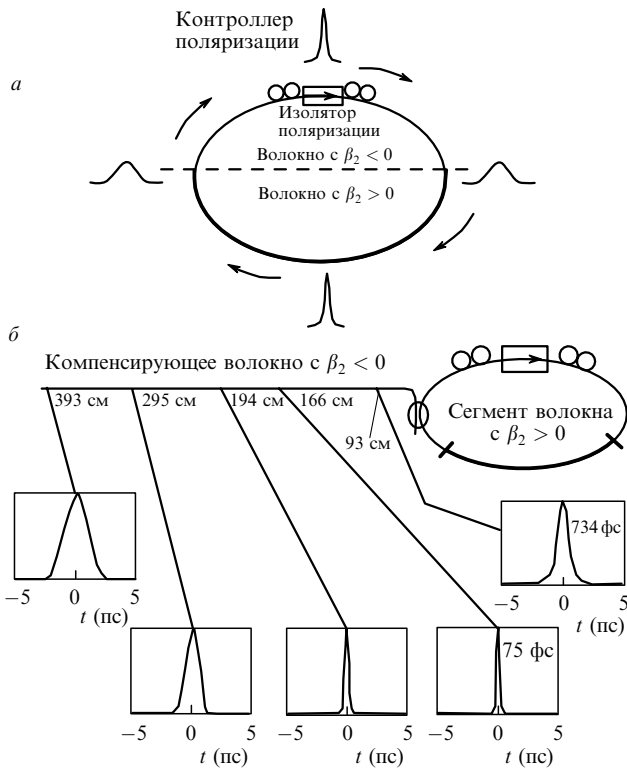


Рис.6. Схема волоконного фемтосекундного лазера, работающего в режиме растяжения импульса (а), и компенсация чирпа на выходе лазера с помощью отрезка волоконного световода с отрицательной ДГС (б). Показано изменение профиля АКФ для отрезков разной длины [11].

методе усиления чирпированного УКИ (растяжение – усиление чирпированных импульсов – сжатие). Таким образом можно существенно увеличить энергию импульса, поскольку интенсивность в результате растяжения остается ниже уровня, требуемого для солитонного режима. Кроме того, для получения данного режима используется активное волокно с малым диаметром сердцевины, что позволяет сосредоточить нелинейное вращение эллипса поляризации в активном волокне с положительной дисперсией и при этом снизить нелинейные эффекты в волокне с отрицательной дисперсией; это также способствует срыву солитонного режима. И, что не менее важно, высокая нелинейность в сочетании с положительной дисперсией позволяет получить значительное уширение спектра. Все это, в принципе, дает возможность увеличить энергию импульса и обеспечить его достаточно малую длительность благодаря сжатию в волокне с подходящим значением ДГС. В результате удается получить примерно в 10 раз большую пиковую мощность одиночного импульса, чем в солитонном режиме.

4. Исследование лазера

Исследования заключались в подборе параметров частот волоконного резонатора, параметров накачки, а также в регистрации осциллограмм интенсивности излучения, спектра генерации и профиля автокорреляционной функции (АКФ) интенсивности. Осциллограммы снимались с помощью pin-фотодиода с волоконным входом и временем нарастания/спада 0.5 нс, а также осциллографа с соответствующим временным разрешением. На рис.7 показана типичная осциллограмма непрерывной последовательности УКИ (частота повторения 25 МГц).

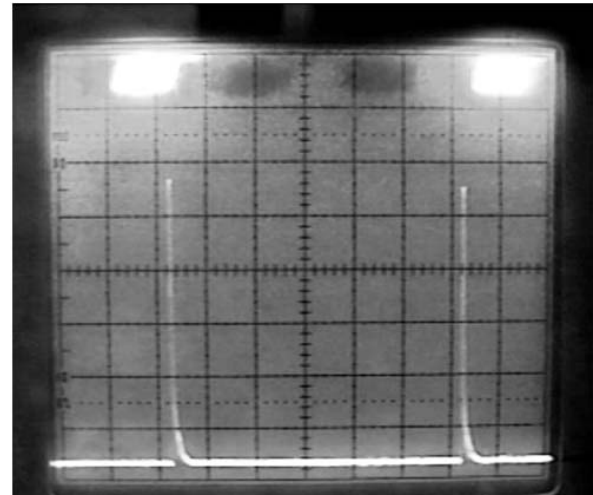


Рис.7. Типичная осциллограмма непрерывной последовательности УКИ (частота повторения 25 МГц).

Спектр излучения регистрировался анализатором спектра Hewlett-Packard. Автокорреляционная функция интенсивности снималась по стандартной методике неколлинеарного синхронизма излучения 2-й гармоники в нелинейном кристалле.

Для получения импульсного режима генерации необходимо было подобрать суммарную дисперсию резонатора $\beta_2 L = \sum \beta_{2i} l_i$. Для этого были рассчитаны дисперсии отдельных волокон в резонаторе ($\beta_{2i} l_i$); длины волокон l_i выбирались такими, чтобы суммарная дисперсия была отрицательной. При подборе суммарной дисперсии в резонаторе определялась зависимость от нее ширины выходного спектра в диапазоне изменений $\beta_2 L$ от -0.08 до -0.01 ps^2 (рис.8), что позволяло найти изменение ширины спектра при подходе к точке нулевой дисперсии ($\beta_2 = 0$). Зависимость $\Delta\lambda(\beta_2 L)$ снималась с помощью выходного ответвителя 10/90. С приближением к точке нулевой дисперсии возникала неустойчивость режима одноимпульсной генерации, обусловленная возрастающей пиковой интенсивностью, которая проявлялась в виде многоимпульсной генерации и появления пьедестала на корреляционной функции. Чтобы определить наличие многоимпульсной генерации, мы помимо осциллографирования использовали большой диапазон сканирования автокоррелятора, который перекрывал временное разрешение фотоприемника. С целью избежать нестабильности мы снизили внутрирезонаторную мощность, поставив выходной ответвитель 20/80 и изменили суммарную диспер-

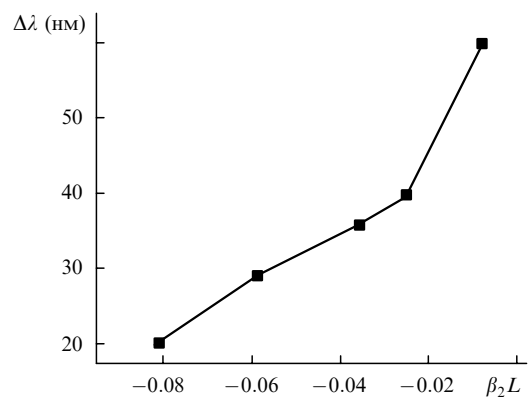


Рис.8. Зависимость ширины спектра генерации от суммарной ДГС.

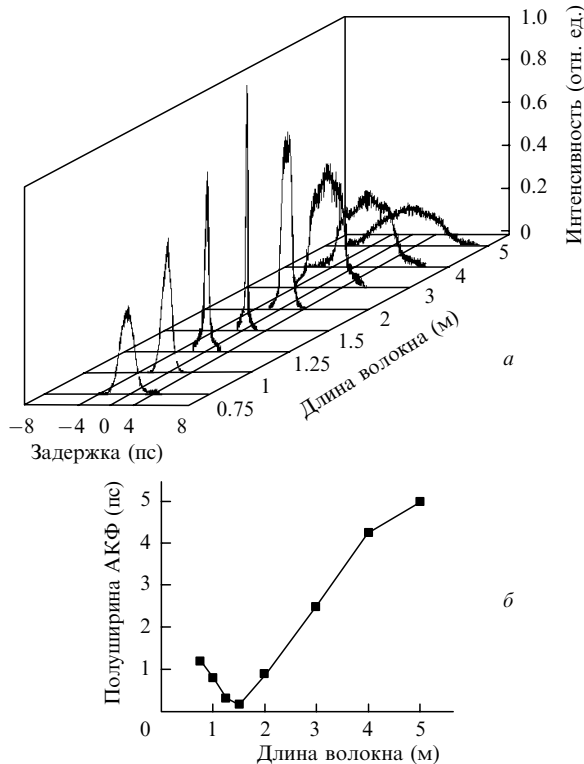


Рис.9. Зависимость профиля АКФ интенсивности от длины компенсирующего волокна (а) и график этой зависимости (б).

сию резонатора до $+0.007 \text{ ps}^2$. Это привело к стабильной генерации импульсов длительностью 110 фс.

Длительность импульса можно сократить путём сжатия chirпированного импульса в волокне с соответствующей дисперсией на выходе из лазера. Измеренная зависимость изменения длительности от длины этого волокна (рис.9) позволила определить длину, при которой импульс максимально сжат. Минимальная длительность импульса составила 97 фс при ширине спектра генерации 53 нм. Спектр и АКФ полученного импульса показаны на рис.10. При мощности накачки 270 мВт на длине волны 1480 нм средняя мощность генерации составила 10 мВт при частоте следования импульсов 25 МГц. При этом мощность диодной накачки Yb-лазера была равна 2.7 Вт.

5. Заключение

На основе световода, активированного ионами Er^{3+} , нами создан волоконный фемтосекундный лазер, работающий на длине волны 1550 нм. Для его возбуждения использовалось излучение с длиной волны 1480 нм, получаемое с помощью рамановского конвертера излучения иттербиевого волоконного лазера с диодной накачкой. Исследования показали, что генерация фемтосекундных лазеров возможна в двух режимах – солитонном и растянутого импульса. Во втором режиме минимальная длительность импульса составила 97 фс при ширине спектра 53 нм. Средняя мощность непрерывной последовательности фемтосекундных импульсов с частотой следования 25 МГц равна 10 мВт при мощности накачки 270 мВт. Непрерывный режим генерации означает, что испускается $\sim 10^6$ узких линий излучения.

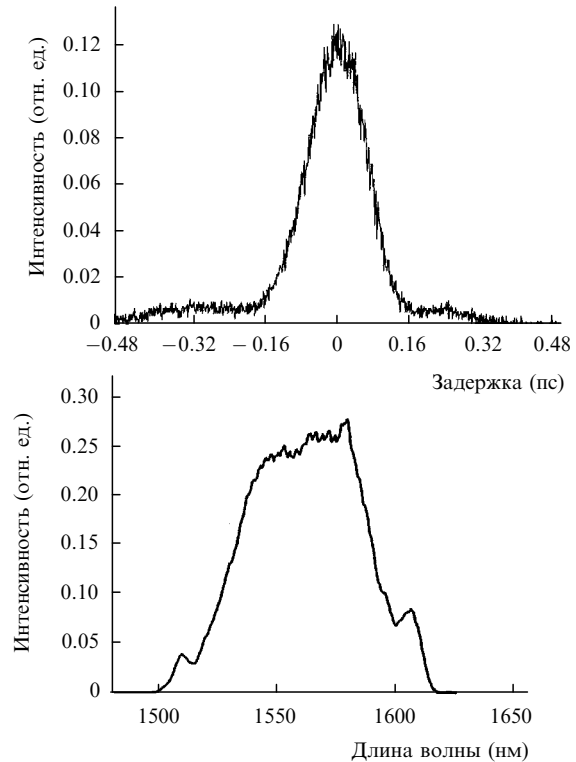


Рис.10. Профиль АКФ интенсивности (а) и спектр (б) импульса минимальной длительности.

Работа проведена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-17079-а). Авторы выражают глубокую благодарность Е.М.Дианову за постановку работы и её обсуждение, а также И.А.Буфетову, М.М.Бубнову, Ю.В.Ларионову, А.А.Рыбалтовскому за помощь в проведении исследований.

1. Дианов Е.М., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 877 (2001).
2. Udem T., Reichert J., Holzwarth R., Hänsch T. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3568 (1999).
3. Diddams S.A., Jones D.J., Cundiff J., Ye T., Hall J.L., Ranka J.K., Winderler R.S., Holzwarth R., Udem T., Hänsch J. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5102 (2000).
4. Jost J.D., Hall J.L., Ye J. *Opt. Express*, **10**, 515 (2002).
5. Takara H., Ohara T., Mori K., Sato K., Yamada E., Inone Y., Shibata T., Abe M., Morioka T., Sato K. I. *Electron. Lett.*, **36**, 2089 (2000).
6. Takada A., Migazawa H. *Electron. Lett.*, **26**, 216 (1990).
7. Tamura K., Doerr C.R., Nelson L.E., Haus H.A., Ippen E.P. *Opt. Lett.*, **19**, 46 (1994).
8. Cautaerts V., Richardson D.J., Paschotta R., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **22**, 316 (1997).
9. Haus H.A., Fujimoto J.G., Ippen E.P. *IEEE. J. Quantum Electron.*, **28**, 2086 (1992).
10. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Belov A.V., Bubnov M.M., Semjonov S.L., Prokhorov A.M. *Electron. Lett.*, **33**, 1542 (1997).
11. Nelson L.E., Jones D.J., Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. *Appl. Phys. B*, **65**, 277 (1997).
12. Mamyshev P.V., Chernikov S.V., Dianov E.M. *IEEE. J. Quantum Electron.*, **27**, 2347 (1991).
13. Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. *Electron. Lett.*, **28**, 2226 (1992).
14. Tamura K., Ippen E.P., Haus H.A., Nelson L.E. *Opt. Lett.*, **18**, 1080 (1993).