

# Компрессия фемтосекундных импульсов иттербиевого лазера, основанная на использовании нелинейных процессов в кварцевом волокне

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, Л.Л.Лосев, А.В.Таусенев, С.Ю.Теняков

*Проведено численное моделирование и экспериментальное исследование временной компрессии наноджоульных лазерных импульсов длительностью 100 фс, основанной на использовании нелинейных процессов в кварцевом волокне. Расчеты показали, что при уширении спектра в волокне с нормальной дисперсией и последующем временном сжатии импульса в компрессоре с отрицательной квадратичной дисперсией возможна концентрация 90% энергии сжатого импульса в пике, длительность которого в восемь раз меньше длительности исходного лазерного импульса. Экспериментально получено сжатие импульсов излучения иттербиевого лазера с длительностью 100 фс в импульсы с основным пиком длительностью ~13 фс, содержащим 87% энергии сжатого импульса. При средней мощности выходного излучения иттербиевого лазера 4.2 Вт мощность излучения после компрессора составила 3.1 Вт.*

*Ключевые слова:* фемтосекундные импульсы, кварцевое волокно, временная компрессия, фазовая самомодуляция.

## 1. Введение

Фемтосекундные лазеры на волокнах и кристаллах, активированных ионами иттербия, с диодной накачкой являются на сегодня наиболее эффективными и широко используемыми лазерными системами. При работе в импульсном режиме они могут генерировать импульсы длительностью ~100 фс при средней мощности выходного излучения более 100 Вт [1]. Генерация более коротких импульсов непосредственно в лазерной системе ограничивается недостаточной шириной линии усиления активной среды (за исключением лазеров, в которых возможны режимы работы с уширением спектра за счет нелинейных процессов непосредственно в активной среде, например в волоконных световодах, и генерацией импульсов со спектром шире полосы усиления [2]). Поэтому для получения импульсов с длительностью ~10 фс используют внешние временные компрессоры лазерных импульсов. В большинстве случаев действие временных компрессоров основано на нелинейном эффекте уширения спектра импульса в процессе фазовой самомодуляции (частотном чирпировании) при распространении импульса в среде с нормальной (положительной) дисперсией с последующей его компрессией на оптическом элементе с отрицательной дисперсией.

Для компрессии импульсов с энергий от 1 мкДж до 10 мДж применяют газонаполненные световоды (капилляры [3, 4] или полые фотонные кристаллы [5]), а в случае меньших энергий – твердотельные волокна [6, 7]. Энергетическая эффективность таких компрессоров превышает 50% при степени компрессии (отношение длительности

исходного лазерного импульса к длительности сжатого импульса) ~10. Принципиальным недостатком компрессоров с газонаполненными световодами, основанных на нелинейном эффекте фазовой самомодуляции, является невысокая степень контраста импульса. После временного сжатия спектрально-уширенного импульса оптическим элементом с отрицательной дисперсией возникает низкоинтенсивный пьедестал с длительностью, близкой к длительности исходного лазерного импульса. Причина получения невысокого контраста связана с тем, что при нелинейной фазовой самомодуляции частотный чирп импульса не является монотонным и меняет свой знак на протяжении импульса. Поэтому оптическим элементом с отрицательной дисперсией (дифракционные решетки, призмы, чирпированные зеркала) обычно компенсируется только положительный монотонно изменяющийся чирп, который возникает в центральной части импульса. Крылья импульса с отрицательным частотным чирпом не подвергаются компрессии и дают низкоинтенсивный пьедестал, в котором может содержаться до 40% энергии импульса (см. ниже). С целью повышения контраста используют дополнительные нелинейные преобразователи, основанные на генерации гармоник, спектральную фильтрацию [8], вращение эллипса поляризации [9] и т. д.

По сравнению с компрессией в газовых средах сжатие лазерных импульсов в твердотельных световодах имеет ряд дополнительных особенностей, обусловленных влиянием дисперсии среды на нелинейный процесс самовоздействия импульса. Процесс уширения спектра происходит в режиме дисперсионной фазовой самомодуляции [10–12], в результате которой появляется возможность получения монотонного, близкого к линейному, частотного чирпа практически на всем протяжении лазерного импульса. Однако при этом имеют место нелинейные эффекты, связанные с обострением фронтов чирпированного лазерного импульса [13], которые приводят к искажению линейного частотного чирпа и снижению контраста сжатого импульса. В этом случае для получения качественных импульсов с высоким контрастом требуется вы-

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, Л.Л.Лосев, А.В.Таусенев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: llosev@mail.ru  
С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11

Поступила в редакцию 6 марта 2018 г., после доработки – 3 апреля 2018 г.

брать диапазон параметров твердотельного световода (диаметр, длина), при котором влияние нежелательных нелинейных эффектов будет минимальным.

Исследования компрессии наноджоульных импульсов в волокнах, проведенные в [6, 7, 10–12], в основном были направлены на получение максимальной ширины спектра chirпированного импульса и, соответственно, минимальной длительности сжатого импульса. Изучению контраста таких импульсов не было уделено достаточного внимания. В настоящей работе мы исследовали процесс компрессии фемтосекундных наноджоульных импульсов иттербиевого лазера в кварцевом волокне с целью получения контрастных импульсов длительностью  $\sim 10$  фс.

## 2. Численное моделирование

Перед началом экспериментов были выполнены численные расчеты нелинейного процесса уширения спектра импульса в кварцевом волокне и последующей временной компрессии. Численно решалось нелинейное уравнение Шредингера с учетом дисперсии среды [14]. Расчеты проводились для лазерного импульса с формой  $\text{sech}^2$  и длительностью 100 фс по уровню половины интенсивности. Энергия лазерного импульса составляла 15 нДж, центральная длина волны равна 1050 нм. Уширение спектра моделировалось при распространении импульса в одно-

модовом кварцевом волокне с диаметром поля моды 4 мкм. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Для определения влияния дисперсии нелинейной среды были выполнены расчеты при нулевой дисперсии волокна и сохранении параметров лазерного импульса (на рис. 1 столбец А). В этом случае форма импульса на выходе активной среды совпадает с формой импульса на входе. Спектр импульса имеет изрезанную (практически со 100%-ной глубиной модуляции) структуру, что наблюдается и в экспериментах с газовыми активными средами [15]. Из зависимости мгновенной частоты импульса от времени видно, что частотный chirп дважды меняет свой знак на протяжении импульса. Поэтому при использовании временного компрессора с отрицательной дисперсией, способного сжимать импульсы с положительным частотным chirпом, часть импульса с отрицательным chirпом не сокращается. Это приводит к возникновению в импульсе низкоинтенсивного пьедестала (рис. 1, А3), который значительно снижает величину контраста. Для исходного лазерного импульса формы  $\text{sech}^2$  в пьедестале с длительностью  $\sim 200$  фс после компрессии содержится 38% энергии импульса. Отметим также, что в «бездисперсионном» случае доля энергии пьедестала определяется только формой исходного лазерного импульса. Так, например, при тех же условиях для импульса гауссовой формы доля энергии в пьедестале составит 39%.

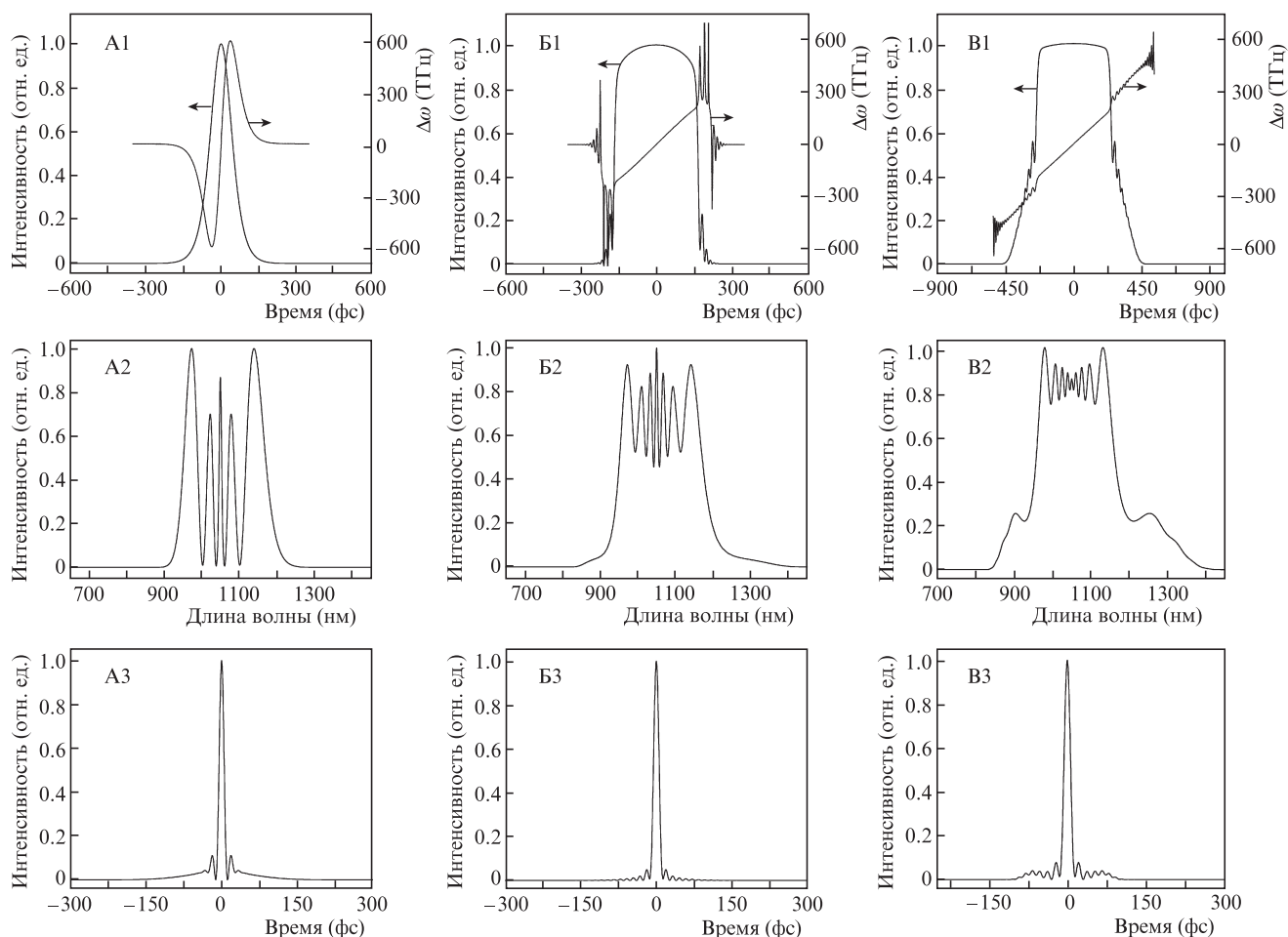


Рис. 1. Рассчитанные параметры импульса на выходе волокна:

столбец А – длина волокна 0.9 см (без учета дисперсии плавленого кварца); столбец Б – длина волокна 2 см; столбец В – длина волокна 4 см; 1-й ряд – формы импульса на выходе волокна и изменение отстройки мгновенной частоты  $\Delta\omega$  во времени ( $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ , где  $\omega$  – мгновенное значение частоты,  $\omega_0$  – центральная частота импульса); 2-й ряд – спектры импульса; 3-й ряд – формы импульса после временной компрессии.

Включение в расчеты дисперсии кварцевого волокна приводит к качественным изменениям в результатах (столбцы Б и В на рис.1). Известно [16], что совместное действие процессов нелинейной фазовой самомодуляции и дисперсионного расплывания импульса позволяет обострить фронты импульса и получить чирп одного знака на протяжении практически всего импульса. Как видно из рисунка, для волокна длиной 2 см (столбец Б) чирп меняет знак только на крыльях импульса с низким уровнем интенсивности (рис.1, Б1), что позволяет повысить контраст сжатого импульса. Доля энергии в его пьедестале теперь составляет 11%. При этом имеет место увеличение длительности и изменение формы импульса на выходе волокна. Интенсивность излучения падает по мере распространения в волокне по сравнению с «бездисперсионным» случаем, поэтому в расчетах потребовалось увеличить длину волокна с 0,9 см (нулевая дисперсия) до 2 см для сохранения ширины спектра.

Дальнейшее увеличение длины волокна не приводит к расширению спектрального диапазона, в котором реализуется линейный чирп. Ширина спектральной области, соответствующей линейному чирпу, составляет  $\sim 400$  ТГц как для волокна длиной 2 см, так и для волокна длиной 4 см (рис.1, Б1 и В1). При этом полная ширина спектра растет с увеличением длины волокна за счет уширения части спектра с нелинейным чирпом. Аналогичная картина наблюдается и во временном масштабе. Длительность участка линейного изменения частоты не изменяется при увеличении длины волокна, причем линейный чирп возникает только в центральной (наиболее интенсивной) части импульса с крутыми фронтами (импульсы Б1 и В1 на рис.1). Из этого следует, что величина линейного чирпа не зависит от длины волокна, и при последующей временной компрессии импульсов на выходе волокон разной длины может использоваться оптический элемент с одной и той же величиной отрицательной дисперсии.

Расчеты также показали, что для волокон короче 2 см имеет место сужение спектра и, соответственно, увеличение длительности импульса после компрессии без существенного изменения доли энергии в основном пике.

Возникновение нелинейного чирпа может быть объяснено динамикой изменения амплитуды волны и спектра на фронтах импульса (optical wave breaking) [13, 17]. Суть явления заключается в том, что в среде с нормальной дисперсией вследствие совместного действия процессов фазовой самомодуляции и дисперсионной задержки в одной и той же точке пространства оказываются волны с разными частотами. Это приводит к генерации новых спектральных компонент в результате нелинейных четырехволновых процессов, и, как следствие, в спектре импульса возникают характерные дополнительные максимумы [13, 17]. В рассчитанном нами спектре они находятся в области длин волн 900 и 1250 нм (см. рис.1, В2). Невозможность полной компенсации нелинейного чирпа оптическими элементами с отрицательной дисперсией второго порядка приводит к ухудшению качества импульса. Расчеты показали, что при сохранении длительности сжатого импульса  $\sim 12$  фс, которая определяется шириной части спектра с линейным чирпом, увеличение длины волокна с 2 до 4 см ведет к возрастанию доли энергии низкоинтенсивного пьедестала с 11% до 24%.

В кварцевом волокне в области нормальной дисперсии ограничение ширины спектра импульса в процессе фазовой самомодуляции может быть объяснено паде-

нием интенсивности из-за расплывания во времени импульса при распространении в нелинейной среде. Для получения более широкого предельного спектра требуется увеличивать интенсивность излучения в волокне, что позволяет сократить длину волокна и снизить влияние дисперсии. Максимально возможное значение интенсивности определяется порогом оптического пробоя среды, который, в свою очередь, зависит от длительности импульса и длины волны лазерного излучения.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что при фазовой самомодуляции в волокнах в области нормальной дисперсии и при заданных параметрах импульса лазерного излучения существует предельное значение ширины спектра с линейным чирпом и, соответственно, предельная степень компрессии (минимальная длительность импульса после компрессора с отрицательной дисперсией второго порядка); причем получение импульсов с высоким значением контраста требует оптимизации длины волокна.

### 3. Экспериментальные результаты

Экспериментально исследовалась компрессия импульсов фемтосекундного иттербиевого лазера ТЕМА (Авеста-Проект). Средняя мощность лазерного излучения достигала 5 Вт при частоте следования импульсов 70 МГц. Длительность импульсов составляла 100 фс, центральная длина волны – 1050 нм.

Оптическая схема эксперимента показана на рис.2. Лазерное излучение фокусировалось на вход одномодового кварцевого волокна HI 1060 FLEX с диаметром поля моды 4 мкм. Для оптической развязки между кварцевым волокном и лазером устанавливался оптический изолятор на основе эффекта Фарадея (Авеста-Проект), который вместе с фазовой полуволновой пластиной выполнял также функцию плавного ослабителя мощности лазерного излучения. Компенсация положительной дисперсии, вносимой оптическим изолятором, осуществлялась при помощи двух чирпированных зеркал с общей отрицательной дисперсией  $-2000$  фс<sup>2</sup>.

На выходе волокна излучение коллимировалось линзой и направлялось во временной компрессор из кварцевых призм, дисперсия которого могла плавно изменяться посредством изменения расстояния между ними. Измерение длительности сжатого импульса проводилось сканирующим автокоррелятором AA-10DD-12PS (Авеста-

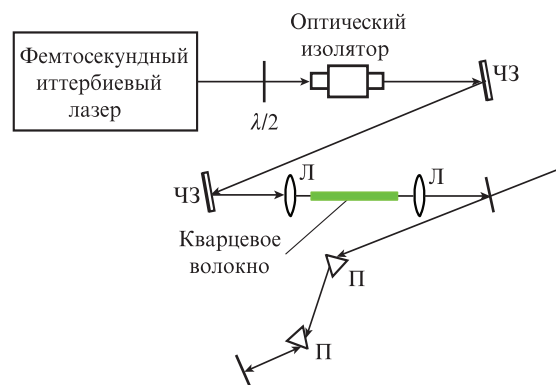


Рис.2. Оптическая схема экспериментальной установки: ЧЗ – чирпированные зеркала; Л – линзы; П – призмы;  $\lambda/2$  – полуволновая фазовая пластина.

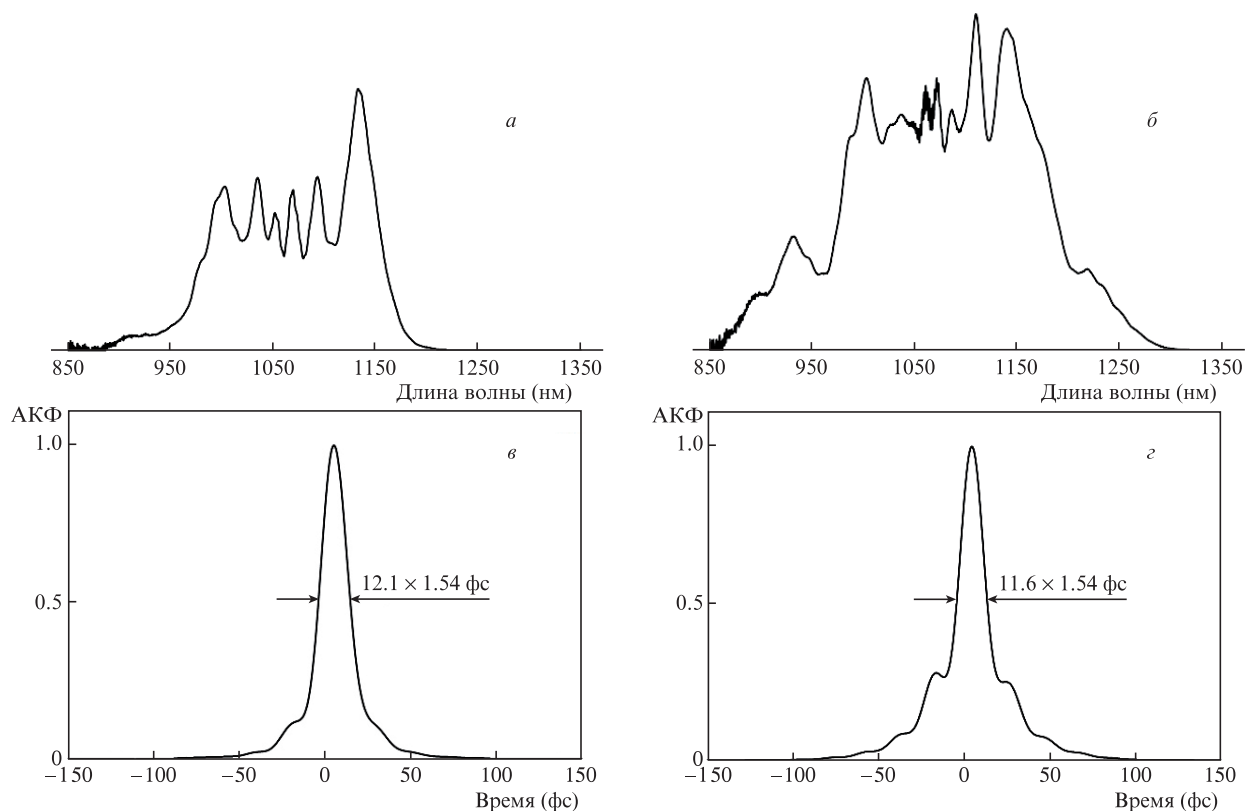


Рис.3. Измеренные спектры (*a*, *б*) и автокорреляционные функции (АКФ) импульсов после компрессии (*в*, *з*) для волокон HI 1060 FLEX длиной 2 (*a*, *в*) и 4 см (*б*, *з*).

Проект). Спектр излучения регистрировался сканирующим спектрометром ASR-IR-1.7 (Авеста-Проект).

На рис.3 представлены экспериментальные результаты, полученные для кварцевых волокон длиной 2 и 4 см. Средняя мощность лазерного излучения на входе в волокно составила 1200 мВт, что соответствует энергии одиночного импульса 17 нДж. Мощность излучения на выходе волокна была 800 мВт в обоих случаях, что свидетельствует об определяющей роли потерь при вводе лазерного излучения в волокно. При отсутствии заметных потерь в призматическом компрессоре энергетическая эффективность системы в целом достигала 65%.

Как видно из рис.3, увеличение длины волокна приводит к уширению спектра и возникновению дополнительных максимумов на краях спектра, что согласуется с проведенными расчетами. Длительность сжатого импульса практически не изменялась с длиной волокна и составляла (в предположении импульса формы  $\text{sech}^2$ ) 11.6 фс для волокна длиной 4 см и 12.1 фс для отрезка длиной 2 см. При этом доля энергии, содержащаяся в пьедестале, возрастала с 12% до 30% при переходе к волокну длиной 4 см. Следует также отметить, что при сохранении длительности сжатого импульса расстояние между призмами компрессора практически не изменялось для обоих волокон. Это говорит об одинаковой длительности части импульса с линейным чирпом и подтверждает результаты расчетов, где было показано, что величина линейного чирпа не меняется при изменении длины волокна (см. рис.1, Б1 и В1).

Измеренные спектры импульсов (рис.3, *a* и *б*) достаточно хорошо согласуются с рассчитанными (рис.1, Б2 и В2). При увеличении длины волокна в спектре наблюдается уменьшение глубины модуляции и возникновение дополнительных максимумов.

Результаты проведенных исследований использовались при компрессии импульсов фемтосекундного иттербиевого лазера большей мощности. Средняя мощность лазера на входе в волокно была повышена до 4.2 Вт, соответственно энергия одиночного импульса составила 60 нДж. Для предотвращения разрушения кварцевого волокна и поддержания интенсивности излучения в волокне на уровне интенсивности в предыдущих экспериментах использовалось кварцевое волокно 1060-XP с диаметром поля моды 7 мкм. С целью повышения эффективности, стабильности работы и сокращения габаритных размеров в этом случае в качестве временного компрессора применялась система из двух чирпированных зеркал. Для согласования спектра излучения на выходе волокна и спектральной области чирпированных зеркал (Layertec,  $-100 \pm 20 \text{ фс}^2$  в диапазоне длин волн 980–1140 нм), в которой значение отрицательной дисперсии примерно одинаково, длина волокна была сокращена до 1.2 см. В результате наблюдалось незначительное сужение спектра и увеличение длительности сжатого импульса по сравнению со случаем волокна длиной 2 см (рис.4). Длительность импульса после компрессии составила 13.2 фс (в предположении  $\text{sech}^2$ ). Доля энергии, содержащейся в низкоинтенсивном пьедестале, осталась на достаточно низком уровне и не превысила 13%. Соответственно, доля энергии в основном импульсе длительностью 13 фс составила 87%. Мощность излучения на выходе компрессора с использованием чирпированных зеркал достигала 3.1 Вт, что соответствует энергетической эффективности компрессора, равной 74%. Более высокое значение эффективности по сравнению с эффективностью компрессора на волокне HI 1060 FLEX обусловлено меньшими потерями лазерного излучения при вводе его в волокно с

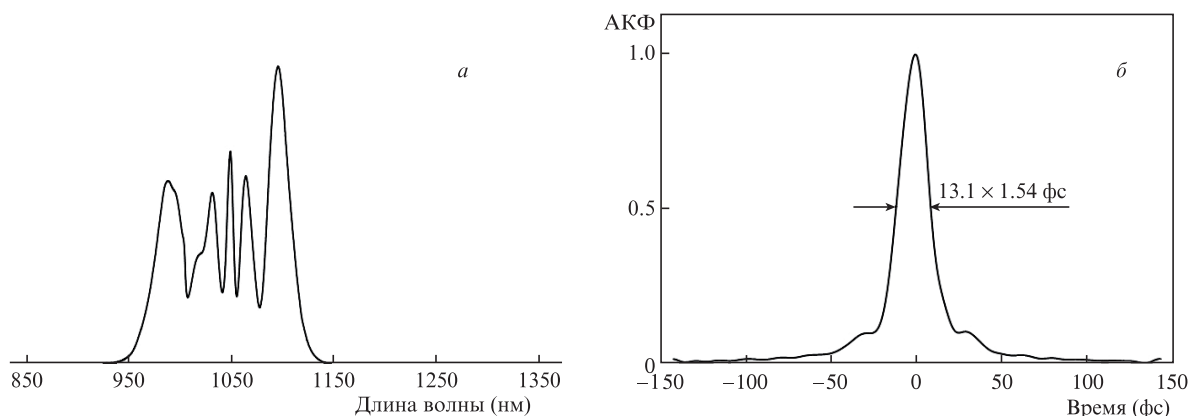


Рис.4. Измеренный спектр (а) и автокорреляционная функция импульса после компрессии (б) для волокна 1060-XP длиной 1.2 см.

большим диаметром поля моды. Пиковая мощность излучения в результате компрессии возросла в 4.9 раза.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. С помощью численного расчета показано, что при компрессии фемтосекундных лазерных импульсов, обусловленной нелинейной фазовой самомодуляцией в волокне с нормальной дисперсией, и последующем прохождении chirpированного импульса через оптический элемент с отрицательной дисперсией второго порядка, существует оптимальная длина волокна, при которой достигается максимальное значение контраста сжатого импульса (т.е. минимальное значение энергии в низкоинтенсивном пьедестале импульса) при сохранении длительности основного пика.

2. С использованием нелинейного волоконного компрессора импульсы излучения иттербиевого лазера (средняя мощность выходного излучения равна 4.2 Вт, частота следования импульсов – 70 МГц) длительностью 100 фс сжаты до длительности 13 фс с эффективностью, равной 74%. Снижение доли энергии, содержащейся в низкоинтенсивном пьедестале, до 13% позволило повысить пиковую мощность лазерного излучения после временной компрессии в 4.9 раза.

- Muller M., Kienel M., Klenke A., Gottschall T., Shestaeв E., Plotner M., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **41**, 3439 (2016).
- Schultz M., Prochnow O., Ruehl A., Wandt D., Kracht D., Ramachandran S., Chalmi S. *Opt. Lett.*, **32**, 2372 (2007).
- Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2793 (1996).
- Диденко Н.В., Конященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С., Теняков С.Ю., Брюханов В.В. *Квантовая электроника*, **46**, 675 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 675 (2016)].
- Russell P.St.J., Holzer P., Chang W., Abdolvand A., Travers J.C. *Nature Photon.*, **8**, 278 (2014).
- Druon F., Georges P. *Opt. Express*, **12**, 3383 (2004).
- Jocher C., Eidam T., Hadrich S., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **37**, 4407 (2012).
- Buldt J., Muller M., Klas R., Eidam T., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **42**, 3761 (2017).
- Конященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **42**, 231 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 231 (2012)].
- Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. *УФН*, **149**, 450 (1986).
- Nikolaus B., Grischkowsky D. *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 1 (1983).
- Reily M.E., McCracken R.A., Farrell C., Reid D.T. *J. Appl. Res. Technol.*, **13**, 555 (2015).
- Tomlinson W.J., Stolen R.H., Johnson A.M. *Opt. Lett.*, **10**, 457 (1985).
- Tomlinson W.J., Stolen R.H., Shank C.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **1**, 139 (1984).
- Конященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **41**, 989 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 989 (2011)].
- Grischkowsky D., Balant A.C. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 1 (1982).
- Anderson D., Desaix M., Lisak M., Quiroga-Teixeiro M.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **9**, 1358 (1992).