

# Генерация спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в спектральном компрессоре

М.А.Калашян, К.А.Паланджян, Г.Л.Есаян, Л.Х.Мурадян

*Для импульсов длительностью 100 фс экспериментально продемонстрирована генерация спектрально-ограниченных импульсов с прямоугольной огибающей в спектральном компрессоре. Характеризация импульсов осуществлена методом спектральной интерферометрии.*

**Ключевые слова:** прямоугольный импульс, фемтосекундный импульс, чирп, спектральная компрессия, спектральная интерферометрия.

## 1. Введение

Интерес к формированию сверхкоротких импульсов (СКИ) с прямоугольной огибающей обусловлен множеством их применений, в частности в сфере оптической связи при калибровке устройств формирования СКИ [1], для контроля светоиндуцированных квантовых состояний [2, 3] и т. д. Формирование таких СКИ пикосекундной длительности осуществляется расщеплением исходного СКИ на множество реплик и их задержкой в наборе двулучепреломляющих кристаллов [4–6, 7] или волоконно-оптических соединителей [8]. При альтернативном подходе прямоугольные СКИ формируются с помощью амплитудно-фазовых спектральных масок, помещенных в фемтосекундную лазерную систему [5, 6], или в световодах с sinc-образной передаточной функцией [7]. Следует отметить, что сформированные этими методами СКИ имеют скорее супергауссов или трапециевидный временной профиль, однако в литературе их принято называть прямоугольными из-за уплощенной вершины и крутых фронтов [9].

Необходимость использования специальных [4–7] устройств в качестве формирователей таких прямоугольных импульсов стимулирует развитие новых подходов к задаче. Привлекательным с точки зрения простоты устройства представляется формирование прямоугольного СКИ в световоде при нелинейно-дисперсионном самовоздействии. Однако такой импульс, сформированный вследствие совместного воздействия керровской нелинейности и дисперсии групповых скоростей, положительно чирпирован [1, 9]. Отсутствия чирпа в сформированном прямоугольном СКИ можно достичь при отрицательном чирпировании СКИ на входе в световод. Такая система, по сути, представляет собой спектральный компрессор, состоящий из дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) и одномодового волоконного световода (ОВС)

[10–12]. Действительно, в работе [13] при анализе роли дисперсии групповых скоростей в процессе спектральной компрессии показана возможность формирования спектрально-ограниченных СКИ с прямоугольной огибающей.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование формирования спектрально-ограниченных прямоугольных СКИ в спектральном компрессоре в соответствии с численным анализом [13]. Исследования проводились с использованием метода спектральной интерферометрии, обеспечивающего полную характеристику комплексного поля излучения [14].

## 2. Методика эксперимента

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из генерирующей системы (титан-сапфировый фемтосекундный лазер Coherent Verdi10-Mira 900F с длиной волны

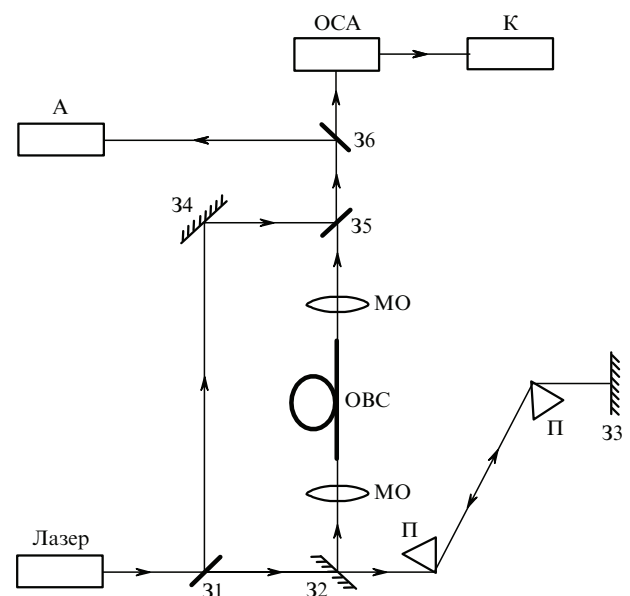


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 31–36 – зеркала; П – призмы; МО – микрообъективы; А – коррелятор; ОСА – оптический спектральный анализатор; К – компьютер.

М.А.Калашян, К.А.Паланджян, Г.Л.Есаян, Л.Х.Мурадян. Ереванский государственный университет, физический факультет, Армения, 0025 Ереван, ул. А.Манукяна 1; e-mail: lmouradian@ysu.am

Поступила в редакцию 17 июля 2009 г., после доработки – 20 сентября 2010 г.

800 нм, длительностью импульса на полувысоте 100 фс, шириной спектра 10.5 нм, частотой повторения 76 МГц и средней мощностью 1.5 Вт (пиковая мощность  $2 \times 10^5$  Вт)), спектрального компрессора, включающего в себя ДЛЗ, в качестве которой используется пара дисперсионных призм П из стекла SF11 с возвращающим зеркалом ЗЗ, и ОВС (Newport F-SE @780 нм), а также регистрирующей системы (оптического спектрального анализатора (ОСА) Ando AQ6315 и коррелятора APE Pulse-Check).

В ходе эксперимента излучение лазера подавалось на вход интерферометра Маха–Цендера, где с помощью полупрозрачного зеркала З1 разделялось на две части. Меньшая часть (20 %) использовалась в качестве опорной волны для спектральной интерферометрии. Большая часть импульсного излучения (80 %) направлялась в спектральный компрессор. Призмы устанавливались так, чтобы пучок падал под углом Брюстера и проходил через их вершины. В ДЛЗ с аномальной дисперсией спектр не меняется, а импульс удлиняется и приобретает отрицательный чирп. После прохождения через ДЛЗ излучение с помощью микрообъектива вводилось в ОВС, где в результате фазовой самомодуляции происходит гашение чирпа и спектральное сжатие импульса.

На выходе спектрально сжатый импульс вместе с опорным направлялся в ОСА, где регистрировалась спектрально-интерференционная картина: наложение спектральных гармоник опорной и сигнальной волн приводит к суммарной спектральной картине с биениями, обусловленными разностью спектральных фаз. Обработка зарегистрированной спектрально-интерференционной кар-

тины с помощью компьютера позволяет восстановить спектральную фазу исследуемого импульса, сформированного в спектральном компрессоре, методом, описанным в [15]. Измерение спектра этого импульса вместе с его восстановленной спектральной фазой дает возможность с помощью фурье-преобразования полностью реконструировать временную амплитуду и фазу СКИ, т. е. полностью охарактеризовать исследуемый импульс. Для временных измерений в ходе эксперимента регистрировались также автокорреляционные функции интенсивности. Этапы эксперимента иллюстрирует рис.2. Для исключения методических ошибок выполнялись контрольные спектральные и корреляционные измерения на входе в ДЛЗ и на выходе из нее, свидетельствующие о неизменности спектра и об ожидаемой степени удлинения СКИ.

Эксперимент проводился в сочетании с численным моделированием процесса на основе нелинейного уравнения Шредингера с учетом керровской нелинейности и дисперсии групповых скоростей, что адекватно описывает исследуемый процесс в области длительностей импульсов  $\sim 100$  фс [9]. Для численного решения уравнения использовался метод расщепления по физическим факторам с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье на дисперсионном шаге.

### 3. Результаты

Проведенные численные исследования для разных длин ДЛЗ и ОВС подтвердили утверждение о том, что формирование прямоугольных импульсов зависит только от соотношения расстояния  $d$  между призмами (ко-

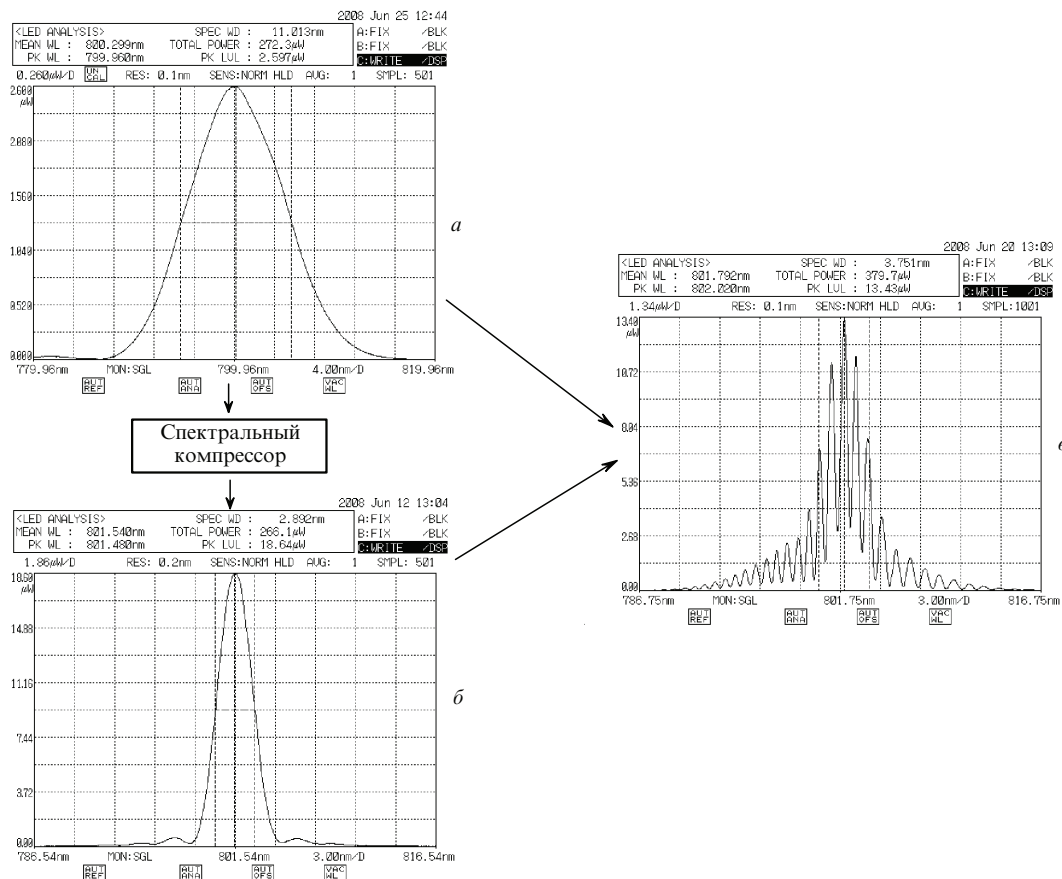


Рис.2. Последовательность проведения эксперимента с помощью соответствующих спектрограмм: спектральный профиль начального импульса (а), спектр на выходе из системы спектральной компрессии (б) и спектральная интерференционная картина (в).

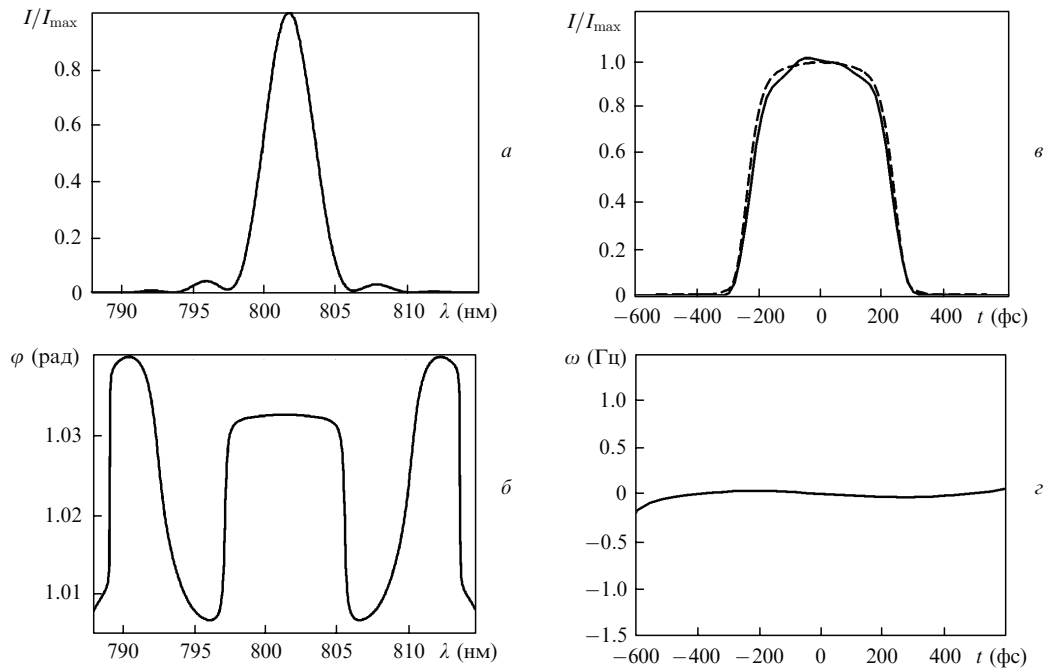


Рис.3. Измеренный спектр (а), восстановленная спектральная фаза (б), временной профиль (в) и чирп импульса (г) при  $d = 90$  см и  $f = 22$  см. Штриховая кривая – временной профиль импульса, полученный в численном эксперименте.

торое мы в дальнейшем будем называть длиной ДЛЗ) и длины  $f$  ОВС [13]: прямоугольные СКИ формируются при  $d/f \approx 1.6k_2^{(f)}/k_2^{(d)}$ , где  $k_2^{(f)} = 10^3$  фс<sup>2</sup>/см и  $k_2^{(d)} = 6.5 \times 10^3$  фс<sup>2</sup>/см – коэффициенты дисперсии групповых скоростей второго порядка для ОВС и ДЛЗ соответственно. В безразмерных переменных это условие имеет вид  $Z/\zeta \approx 1/6$  ( $\sim 2$  в [13]), где  $\zeta = f/L_D^{(f)}$ ,  $Z = d/L_D^{(d)}$ ,  $L_D^{(f)} = \tau_0^2/k_2^{(f)}$ ,  $L_D^{(d)} = \tau_0^2/k_2^{(d)}$ ,  $\tau_0$  – начальная длительность импульса [9]. При этом достигается максимальная спектральная компрессия.

Экспериментальные исследования проводились для следующих параметров системы: длина ДЛЗ  $d = 90$  см ( $Z = 5.4$ ), длина ОВС  $f = 22$  см ( $\zeta = 3.2$ ). Степень спектральной компрессии СКИ на выходе из такой системы составляла 2.8, т. е. ширина спектра в этом случае равнялась 3.7 нм. Сжатый спектр с небольшими спутниками является sinc-образной функцией, представляющей собой фурье-образ прямоугольной функции (рис.2,б). Результаты измерений приведены на рис.3. Из рис.3,б и г

видно, что у фаз полученных прямоугольных СКИ практически отсутствует модуляция, т.е. импульсы спектрально ограничены. Штриховая кривая на рис.3,в, показывающая результаты численного моделирования при соответствующих параметрах излучения и устройства, находится в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

По восстановленным временным профилям импульсов рассчитывались автокорреляционные функции интенсивностей и сравнивались с зарегистрированными с помощью коррелятора. На рис. 4 представлены корреляционные функции прямоугольного СКИ. Видно, что измеренные и рассчитанные корреляционные функции находятся в количественном соответствии.

На рис.5 показана зависимость степени спектрального сжатия от средней мощности излучения в ОВС для  $d = 90$  см и  $f = 22$  см. Мощность регулировалась путем изменения эффективности ввода излучения в ОВС. Видно, что с увеличением мощности спектр импульса сужается, однако при мощности свыше 120 мВт вновь наблюдается его уширение. Экспериментальные результаты на-

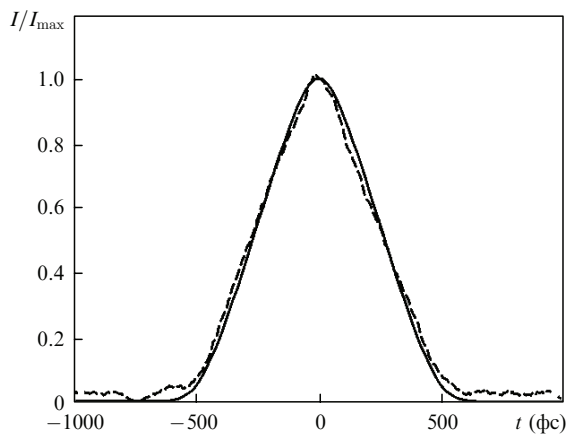


Рис.4. Корреляционные функции прямоугольного импульса: рассчитанная из временного профиля импульса (сплошная кривая) и измеренная (штриховая кривая).

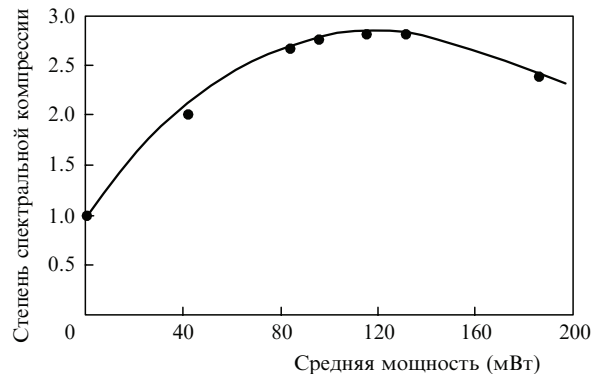


Рис.5. Зависимость степени спектральной компрессии от средней мощности излучения в ОВС при  $d = 90$  см и  $f = 22$  см. Точки – эксперимент, сплошная кривая – расчет.

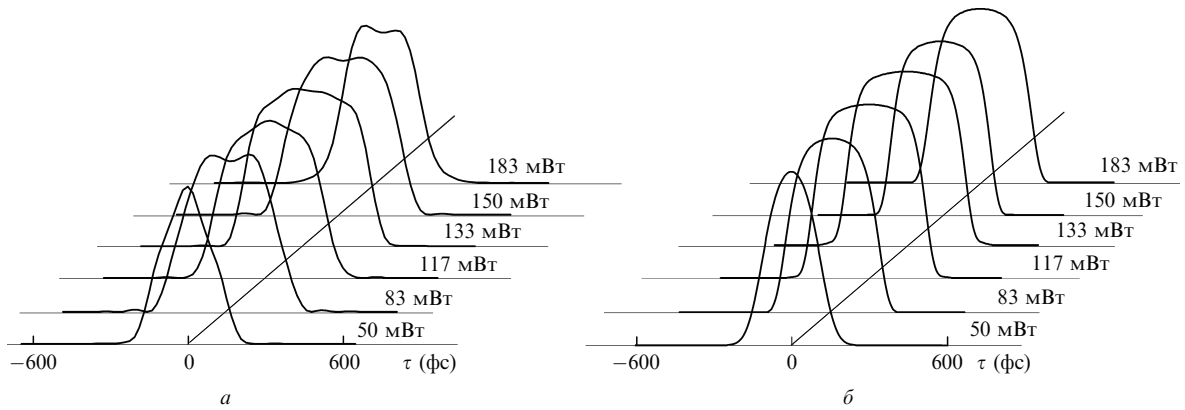


Рис.6. Экспериментальные (а) и расчетные (б) временные профили импульсов при  $d = 90$  см,  $f = 22$  см и разных значениях средней мощности излучения в ОВС. Амплитуды импульсов нормированы на свои пиковые значения.

ходятся в согласии с численными. Экспериментальные исследования в соответствии с численными показали, что прямоугольные импульсы формируются в области максимальной спектральной компрессии. Численные исследования показали также, что для других длин ДЛЗ и ОВС при сохранении соотношения  $Z/\zeta \approx 1.6$  зависимость степени спектральной компрессии от средней мощности излучения в ОВС имеет тот же вид, при этом меняется только масштаб. Так, например, при больших длинах ДЛЗ увеличивается как степень максимального спектрального сжатия, так и соответствующее значение мощности.

При других значениях мощности, не соответствующих максимальной спектральной компрессии, профиль СКИ отличался от прямоугольного. Временные профили импульсов на выходе из системы спектральной компрессии при разных значениях средней мощности излучения в ОВС приведены на рис.6.

Формирование прямоугольных СКИ при том же соотношении  $Z/\zeta = 1.6$ , но при других длинах ДЛЗ и ОВС

( $d = 142$  см ( $Z = 10.3$ ) и  $f = 44$  см ( $\zeta = 6.7$ )) иллюстрирует рис.7. Видно, что восстановленные импульсы также имеют прямоугольную форму. В этом случае ширина спектра составляла 3 нм, т. е. спектр был сжат в 3.5 раза. Проведенные исследования показали, что крутизна фронтов получаемых импульсов, как и в работах [4–7], определяется длительностью начального гауссова импульса и не зависит от параметров компрессора. Однако при больших длинах ДЛЗ, когда достигается большая степень спектральной компрессии, формируются более длинные импульсы. Если в качестве критерия прямоугольности использовать соотношение длительностей фронтов и вершин импульсов [4], то можно сказать, что при больших длинах ДЛЗ и ОВС полученные импульсы имеют форму, более близкую к прямоугольной.

Необходимо подчеркнуть, что для формирования прямоугольных СКИ, помимо максимального сжатия, должно удовлетворяться также условие  $Z/\zeta = 1.6$ . Для подтверждения этого была исследована спектральная

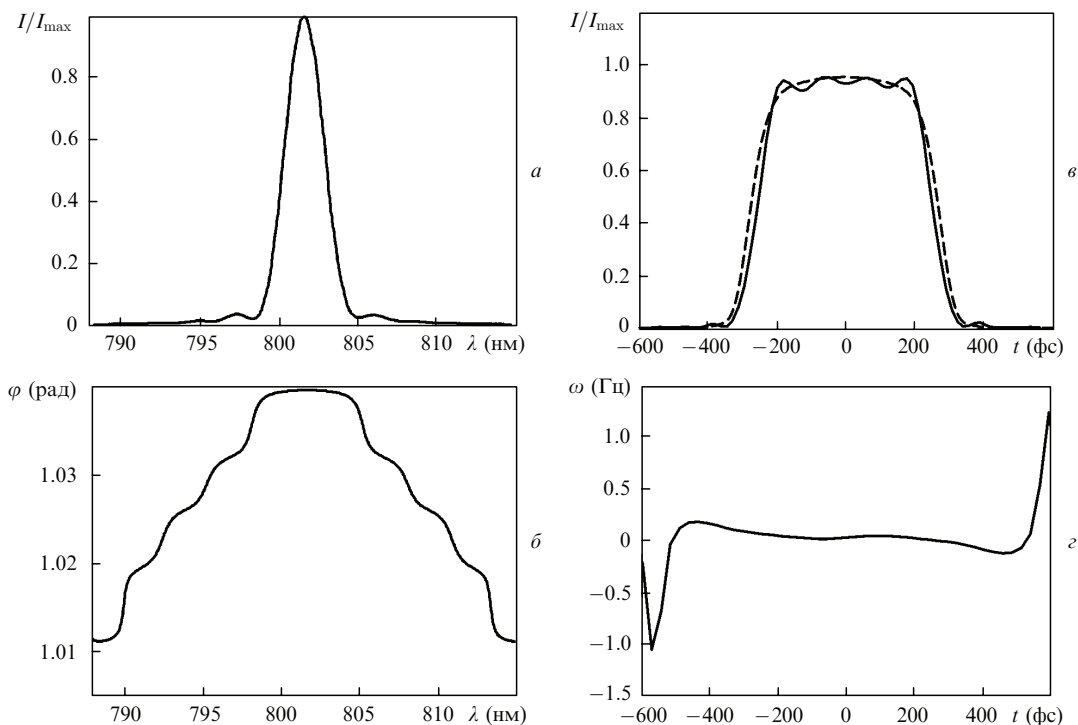


Рис.7. Измеренный спектр (а), восстановленная спектральная фаза (б), временной профиль (в) и чирп импульса (г) при  $d = 142$  см и  $f = 44$  см. Штриховая кривая – временной профиль импульса, полученный в численном эксперименте.

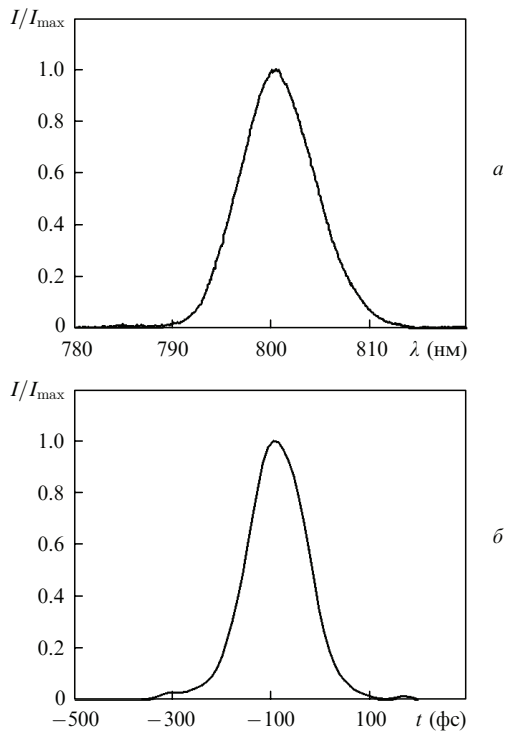


Рис.8. Профили импульса в режиме блокировки спектральной компрессии: спектр (а) и временной профиль импульса (б) при  $d = 90$  см,  $f = 44$  см.

компрессия при соотношении  $Z/\zeta \approx 1$ . В частности, при  $d = 90$  см ( $Z = 5.4$ ) и  $f = 44$  см ( $\zeta = 6.7$ ) (рис.8) временные профили импульсов, как и следовало ожидать, не имеют прямоугольной формы. В данном режиме за счет дисперсии в ОВС удлиненный в ДЛЗ импульс сжимается, и тем самым блокируется спектральная компрессия [13]. В эксперименте при этом степень максимальной спектральной компрессии составляла 1.2.

Следует отметить, что приведенные результаты находятся также в соответствии с результатами работы [12]. Хотя целью этой работы не являлось получение

импульсов определенной формы, однако вследствие того, что в ней  $Z/\zeta \approx 1.7$ , на выходе из спектрального компрессора также получались импульсы с уплощенной вершиной и sinc-образным спектром.

#### 4. Заключение

Экспериментально исследовано формирование спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в системе спектральной компрессии. Показано, что формирование таких импульсов не зависит от длин ДЛЗ и ОВС, а зависит только от соотношения расстояния между призмами и длины световода. Исследования показали, что прямоугольные СКИ формируются при соотношении длин ДЛЗ и ОВС  $Z/\zeta \approx 1.6$  в области максимальной спектральной компрессии. При длинах ДЛЗ, меньших длины ОВС, происходит блокировка спектральной компрессии.

Полученные результаты могут быть полезны для задач управления оптическими сигналами, их передачи и регистрации.

1. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996).
2. Citrin D.S. *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 4596 (1996).
3. He G.S., Liu S.H. *Physics of Nonlinear Optics* (Singapore: World Scientific, 1999).
4. Will Ingo, Klemz Guido. *Opt. Express*, **16** (19), 14922 (2008).
5. Cialdi S., Boscolo I., Flacco A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21**, 1693 (2004).
6. Cialdi S., Boscolo I. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **538**, 1 (2005).
7. Wang D., Fujioka S., Lim H.C., Thanakom K., Kim S.-Y., Kikuchi K. *Dig. Conf. CLEO-2006* (Lohg Beach, California, 2006, p. JThC105).
8. Wang W., Wang Y., Allaart K., Lenstra D. *Proc. Symp. IEEE/LEOS Benelux Chapter* (Ghent University, Belgium, 2004).
9. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов* (М.: Наука, 1988).
10. Маркарян Н.Л., Мурадян Л.Х., Папазян Т.А. *Квантовая электроника*, **18** (7), 865 (1991).
11. Oberthaler M., Hopfel R.A. *Appl. Phys. Lett.*, **63** (8), 1017 (1993).
12. Washburn B.R., Buck J.A., Ralph S.E. *Opt. Lett.*, **25** (7), 445 (2000).
13. Кутузьян А.А., Мансурян Т.Г., Есаян Г.Л., Акопян Р.С., Мурадян Л.Х. *Квантовая электроника*, **38**, 383 (2008).
14. Froehly C., Lacourt A., Vienot J.C. *J. Opt. (Paris)*, **4**, 183 (1973).
15. Takeda M., Ina H., Koyabashi S. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1), 156 (1982).