

# Степень компрессии и энергетическая эффективность капиллярного компрессора фемтосекундных лазерных импульсов

А.В.Конященко, П.В.Кострюков, Л.Л.Лосев, С.Ю.Теняков

*Для временных компрессоров фемтосекундных лазерных импульсов, основанных на эффекте уширения спектра в газонаполненном капилляре, выведено соотношение между степенью компрессии и энергетической эффективностью компрессора. Показано, что максимальная степень компрессии достигается при энергетической эффективности 15%–30%. Осуществлена 15-кратная компрессия лазерного импульса длительностью 290 фс с энергетической эффективностью 24%.*

**Ключевые слова:** фемтосекундные импульсы, капилляр, компрессия импульсов.

## 1. Введение

Временная компрессия фемтосекундных лазерных импульсов на основе нелинейного процесса – уширения спектра в газонаполненном капилляре, широко используется в настоящее время для импульсов с энергиями до  $\sim 10$  мДж [1–7]. Капиллярные компрессоры импульсов, включающие в себя камеру с расположенным внутри нее капилляром и собственно временной компрессор, позволяют осуществлять максимальное уменьшение длительности импульса в 15 раз. Максимальная степень компрессии (отношение длительности импульса на входе в компрессор к длительности сжатого импульса) реализуется для импульсов длительностью не менее 50 фс. Для более коротких лазерных импульсов степень компрессии уменьшается. Так, импульсы длительностью  $\sim 20$  фс сжимаются до импульсов длительностью  $\sim 5$  фс [8]. Важным параметром компрессора, наряду со степенью компрессии, является его энергетическая эффективность – отношение энергии сжатого импульса к энергии импульса на входе в компрессор. В основном энергетическая эффективность компрессора определяется потерями при распространении импульса в капилляре, который в большинстве случаев изготавливается из кварцевого стекла. Измеренная энергетическая эффективность капиллярных компрессоров, варьируется в пределах 20%–70%.

Степень компрессии (или уширение спектра) и эффективность капиллярного компрессора определяются размерами капилляра (длиной и внутренним диаметром), а также составом и давлением газа внутри капилляра. Для оценки формы и ширины спектра выходного излучения обычно используются результаты численного решения

уравнений, описывающих нелинейное распространение фемтосекундного импульса в газонаполненном капилляре. Результаты численных расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными [5, 6]. Однако оптимизация режима работы капиллярного компрессора для достижения максимальной энергетической эффективности при заданной степени компрессии и оценка влияния параметров компрессора на его выходные характеристики требуют значительного объема численных расчетов и проводятся не в каждом конкретном случае. Поэтому возникает необходимость в получении достаточно простых аналитических выражений, на основе которых можно было бы оценить и оптимизировать характеристики капиллярного компрессора. В качестве примера такого выражения можно привести формулу, представленную в работе [9], которая связывает уширение спектра с внутренним диаметром капилляра.

Цель настоящей статьи – разработка метода аналитической оценки характеристик капиллярного компрессора и проведение экспериментов для подтверждения результатов анализа.

## 2. Аналитический расчет капиллярного компрессора

В данной работе нами рассматриваются капиллярные компрессоры, в которых уширение спектра лазерного импульса осуществляется только в процессе фазовой самомодуляции, вызванной нелинейной зависимостью показателя преломления нейтральной газовой среды от интенсивности излучения. Процесс уширения спектра, возникающий при ионизации газа фемтосекундным лазерным импульсом, не анализируется в настоящей работе. Кроме того, не учитывается изменение длительности распространяющегося в капилляре импульса из-за дисперсии активной среды. Вследствие этого, полученные ниже результаты применимы для световых импульсов длительностью не менее 50 фс с интенсивностью излучения внутри капилляра не более  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> при длине волны излучения  $\sim 1$  мкм.

На практике длина капилляра компрессора обычно определяется размерами кюветы, в которую помещают капилляр. Поэтому изменение длины капилляра в доста-

А.В.Конященко, П.В.Кострюков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2

С.Ю.Теняков. ООО «Авеста-Проект», Россия, Московская обл., 142190 Троицк, территория ФИАН, КРФ-2

Л.Л.Лосев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53;

e-mail: losev@pluton.lpi.troitsk.ru

точно широких пределах часто не представляется возможным. Оптимизация характеристик компрессора может быть проведена посредством варьирования пропускания капилляра фиксированной длины (за счет изменения его внутреннего диаметра), а также давления и состава газа в капилляре.

Уширение спектра импульса (отношение ширины спектра излучения на выходе капилляра  $\Delta\omega$  к ширине спектра на входе  $(\Delta\omega)_0$ ) вследствие фазовой самомодуляции при распространении его в капилляре определяется выражением [10]

$$F = \frac{\Delta\omega}{(\Delta\omega)_0} = (1 + 0.77\varphi^2)^{1/2}. \quad (1)$$

Величина  $\varphi$  является нелинейным набегом фазы, определяемым выражением

$$\varphi = n_2 \frac{2\pi}{\lambda} I \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} = n_2 \frac{2\pi}{\lambda} I \frac{(1 - T)L}{-\ln T}, \quad (2)$$

где  $n_2$  – нелинейная часть показателя преломления газа;  $\lambda$  – центральная длина волны;  $I$  – пиковая интенсивность излучения внутри капилляра;  $\alpha$  – коэффициент ослабления излучения в капилляре;  $T$  и  $L$  – пропускание (отношение энергии импульса на выходе капилляра к энергии импульса, введенной в капилляр) и длина капилляра соответственно.

Максимальная интенсивность излучения в капилляре и, следовательно, максимальное уширение спектра ограничиваются процессом возбуждения высших пространственных мод. Высшие моды имеют более высокие потери при распространении в капилляре по сравнению с низшей модой. Поэтому на практике обычно используют капиллярные компрессоры с распределением интенсивности низшей моды, близким к гауссову. Высшие моды возникают при достаточно большой интенсивности излучения внутри капилляра вследствие влияния нелинейной части показателя преломления. Максимальная интенсивность низшей моды  $EH_{11}$  в капилляре, при которой еще не наблюдаются высшие моды, есть [2]

$$I_{\max} \approx \frac{0.07\lambda^2}{n_2 a^2}, \quad (3)$$

где  $a$  – внутренний радиус капилляра. Отметим, что максимальная мощность излучения низшей моды в капилляре, пропорциональная  $I_{\max} a^2$ , не зависит от диаметра капилляра.

При фиксированной мощности лазерного импульса значение  $n_2$ , при котором достигается максимальное уширение спектра импульса и выполняется соотношение (3), может быть получено посредством изменения давления газа внутри капилляра, поскольку  $n_2(p) \approx n_2(1 \text{ атм})p$ , где  $n_2(1 \text{ атм})$  – нелинейный показатель преломления при давлении газа  $p = 1 \text{ атм}$ .

Из (2) и (3) видно, что при максимальной интенсивности излучения низшей моды капилляра соответствующее ей максимальное уширение спектра не зависит от нелинейного показателя преломления среды, а значит, и типа газа в капилляре.

Коэффициент ослабления излучения в диэлектрическом капилляре определяется выражением [11]

$$\alpha = k \frac{\lambda^2}{a^3} = \frac{-\ln T}{L}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от индекса моды, показателей преломления газа и материала стенки капилляра.

Подставляя в (2) максимальную интенсивность, определяемую соотношением (3), а также выражая внутренний радиус капилляра  $a$  через его пропускание  $T$  и длину  $L$  из (4), получаем следующее выражение для максимального нелинейного набега фазы  $\varphi_{\max}$ :

$$\varphi_{\max} \approx \frac{0.4}{k^{2/3}} \left(\frac{L}{\lambda}\right)^{1/3} \frac{1 - T}{(-\ln T)^{1/3}}. \quad (5)$$

При значительном уширении спектра ( $F \geq 2$ ) выражение (1) можно записать в виде

$$F_{\max} \approx 0.88\varphi_{\max}. \quad (6)$$

Введем функцию

$$K = F_{\max} \left(\frac{\lambda}{L}\right)^{1/3} \approx c \frac{1 - T}{(-\ln T)^{1/3}}. \quad (7)$$

Данная функция зависит только от пропускания капилляра.

На рис.1 показана функция  $K(T)$ . Она имеет максимум при  $T \approx 0.16$ . Там же приведены экспериментальные данные, взятые из различных работ. Для каждого экспериментального значения  $K$  рассчитывалось пропускание капилляра, исходя из его длины, внутреннего диаметра и длины волны лазерного излучения. Уширение спектра определялось из представленных экспериментальных данных. Они достаточно хорошо согласуются с рассчитанной зависимостью. При расчете для константы  $c$  в (7) использовалось выражение  $c = 0.4s/k^{2/3}$ , где  $s$  – коэффициент, введенный для более точного согласования расчетной кривой и экспериментальных данных. Для кварцевых капилляров и низшей моды  $k = 0.42$ . Наилучшее согласие функции  $K$  с данными эксперимента достигается при  $c = 0.44$ . Соответственно константа  $s = 0.62$ .

Экспериментальные данные, приведенные на рис.1, взяты из работ, в которых уширение спектра достигалось только за счет фазовой самомодуляции и излучение распространялось в кварцевом капилляре на низшей моде  $EH_{11}$ . Однако при этом длины и диаметры капилляров изменялись в широких пределах. Например, в [7] длина ка-

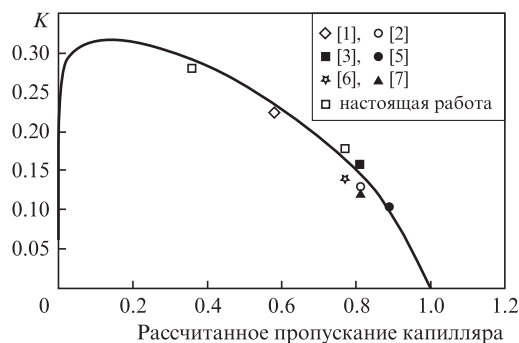


Рис.1. Расчетная (сплошная кривая) и экспериментальная (точки) зависимости функции  $K$  от рассчитанного пропускания капилляра. Для каждой экспериментальной точки приведена ссылка на работу, из которой были взяты данные.

пилляра составляла 3 м, в то время как в настоящей работе – 20 см. Изменялась также и длина волны лазерного излучения – от 0.5 до 1 мкм.

Используя полученную связь (7) пропускания капилляра (или энергетической эффективности компрессора) и уширения спектра можно легко оценить максимально возможное уширение спектра импульса на выходе капилляра. При этом, как следует из расчетов, максимально возможное уширение спектра в капилляре с фиксированной длиной достигается при его пропускании, равном 0.16. Для кварцевых капилляров в этом случае выполняется следующее соотношение между его длиной и внутренним диаметром:

$$L \approx 4.4 \frac{a^2}{\lambda^2}. \tag{8}$$

Данное выражение получено путем подстановки в (4) значения  $T = 0.16$ .

Степень компрессии, равная отношению длительности импульса на входе в компрессор  $\tau_0$  к длительности сжатого импульса  $\tau$ , определяется уширением спектра в газонаполненном капилляре и может достигать максимального значения, равного уширению спектра  $F$ , хотя обычно она несколько меньше уширения спектра. Это связано с тем, что вследствие изрезанной формы уширенного при фазовой самомодуляции спектра длительность сжатого импульса превышает длительность импульса со спектром такой же ширины, но гладкой формы.

Как следует из приведенных выше расчетов, максимальная степень компрессии может быть получена при пропускании капилляра 15%–30%. Этот довольно широкий интервал значений пропускания капилляра связан с положим максимумом функции  $K$  (рис.1). Соответственно энергетическая эффективность капиллярного компрессора при максимальной степени компрессии составит 15%–30%. В случае увеличения энергетической эффективности компрессора до 70%–90% при сохранении длины капилляра степень компрессии уменьшится примерно в два раза. Именно в таком режиме (высокой энергетической эффективности и неоптимальной компрессии) работает большинство компрессоров [2–7]. Отметим также возможность повышения энергетической эффективности компрессора при заданной степени компрессии посредством увеличения длины капилляра. Поскольку функция  $F \sim L^{1/3}$ , то, увеличивая длину капилляра, можно достичь желаемой степени компрессии при более высоком пропускании капилляра. Естественно, диаметр капилляра в этом случае также возрастает.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований капиллярного компрессора, проведенных с целью дополнительного подтверждения выполненных расчетов.

### 3. Экспериментальные результаты

Эксперименты проводились с использованием фемтосекундного иттербиевого лазера ТЕТА-3 (Авеста-Проект). Импульсы на выходе лазерной системы имели длительность 290 фс и энергию до 150 мкДж. Длина волны излучения составляла 1028 нм, частота повторения импульсов – 3 кГц. Диаметр светового пучка с гауссовым распределением интенсивности был равен 4 мм по уровню интенсивности  $1/e^2$ , расходимость составляла 1.05 дифракционных предела.

Лазерное излучение фокусировалось на вход кварцевого капилляра, помещенного в камеру длиной 30 см. Эксперименты проводились с двумя капиллярами с внутренними диаметрами 90 и 140 мкм. Длина капилляра в обоих случаях равнялась 20 см. Для фокусировки в капилляр с внутренним диаметром 140 мкм применялась линза с фокусным расстоянием  $f = 30$  см, а для фокусировки в капилляр с внутренним диаметром 90 мкм – линза с  $f = 17$  см. В качестве активного газа использовался ксенон. Световой пучок на выходе капилляра коллимировался линзой и направлялся в призмный временной компрессор. Измерение длительности сжатого импульса осуществлялось автокоррелятором ASF-20 (Авеста-Проект).

На рис.2 показаны зависимости отношения энергии импульса на выходе капилляра  $E_{out}$  к энергии импульса на входе  $E_{in}$  от давления ксенона при фиксированной энергии входного импульса 125 мкДж. Видно, что отношение энергий импульсов начинает уменьшаться при давлении ксенона  $\sim 5$  атм для обоих капилляров. Уменьшение выходной энергии может быть обусловлено процессом возбуждения высших мод при увеличении давления газа. В согласии с вышеизложенным, давление газа, при котором возникает этот процесс, не зависит от внутреннего диаметра капилляра. Рассчитанное значение критической мощности в капилляре [2]  $P_{cr} \approx 0.1\lambda^2 n_2$  составляет  $\sim 0.4$  ГВт для ксенона при давлении 4 атм (для ксенона  $n_2 = 8.1 \times 10^{-19} \text{ см}^2 \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$  [1]), что близко к мощности лазерного импульса в эксперименте, равной  $\sim 0.4$  ГВт. Отметим также, что максимальное значение интенсивности лазерного излучения достигалось на входе в капилляр с внутренним диаметром 90 мкм и составляло  $\sim 1.3 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ . При такой интенсивности ионизация газа незначительна [8] и не вносит заметного вклада в процессы уширения спектра и поглощения лазерного излучения.

Измеренное отношение энергий импульсов равно произведению пропускания капилляра  $T$  на коэффициент ввода энергии в капилляр  $b$ :  $E_{out}/E_{in} = bT$ . Значение  $b$  в условиях нашего эксперимента составило  $\sim 0.8$ . (Величина  $b$  определялась посредством измерения пропускания капилляров разной длины и одного диаметра.) Соответственно пропускание капилляра равно  $\sim 0.7$  для капилляра с внутренним диаметром 140 мкм и  $\sim 0.3$  для капилляра диаметром 90 мкм. Рассчитанные значения пропускания для этих капилляров составляют 0.77 и 0.36 соответственно.

Спектры импульсов выходного излучения представлены на рис.3,а и в. При давлении ксенона 4 атм ширина спектра излучения была равна  $\sim 70$  нм для капилляра с

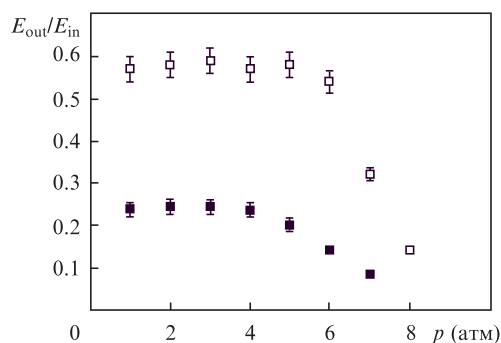


Рис.2. Зависимости отношения энергии импульса на выходе капилляра к энергии входного импульса от давления ксенона для капилляра с внутренним диаметром 90 мкм (■) и 140 мкм (□).

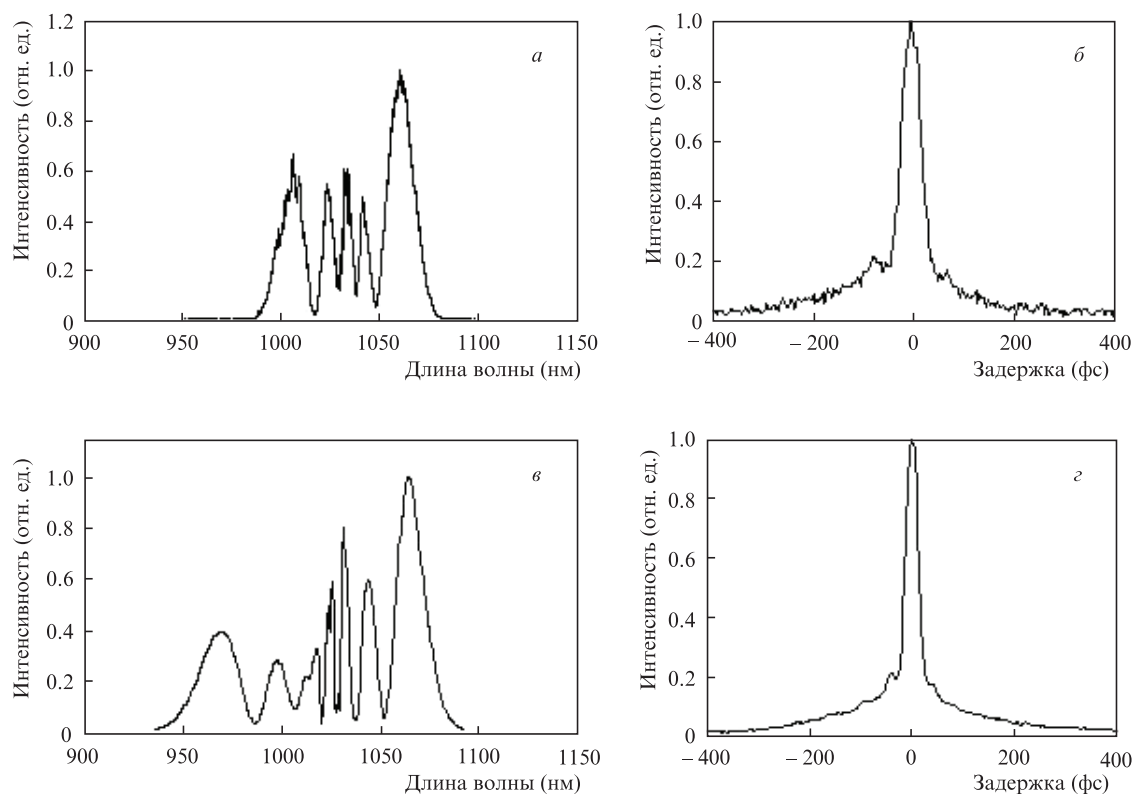


Рис.3. Спектры излучения на выходе капилляра (*a, в*) и автокорреляционные функции сжатого импульса (*б, г*) для капилляра с внутренним диаметром 140 (*а, б*) и 90 мкм (*в, г*).

внутренним диаметром 140 мкм и  $\sim 110$  нм для капилляра диаметром 90 мкм. Ширина спектра импульса на входе в капилляр составляла  $\sim 7$  нм. Исходя из этого, получено уширение спектра в  $\sim 10$  раз в капилляре диаметром 140 мкм и в  $\sim 15$  раз в капилляре диаметром 90 мкм. Эти результаты находятся в согласии с расчетными ширинами спектра для капилляров с такими же значениями пропускания (рис.1).

Измеренные автокорреляционные функции сжатых импульсов показаны на рис.3,*б* и *г*. В соответствии со спектральными характеристиками длительности импульсов после компрессии составили 31 фс для капилляра с внутренним диаметром 140 мкм и 20 фс для капилляра диаметром 90 мкм.

#### 4. Заключение

В настоящей работе проведен анализ влияния параметров капиллярного компрессора на его энергетическую эффективность и степень компрессии импульса. Показано, что при заданной длине капилляра максимальная степень временной компрессии импульса может быть достигнута при пропускании капилляра и соответственно энергетической эффективности компрессора 15%–30%. При этом максимальная степень компрессии растет при увеличении длины капилляра  $L$  как  $L^{1/3}$ .

На основе проведенного анализа осуществлена 15-кратная компрессия: импульс излучения иттербиевого лазера длительностью 290 фс сжат до импульса длительностью 20 фс с энергетической эффективностью 24%. Для этого использовался капилляр длиной 20 см с внутренним диаметром 90 мкм. Результаты эксперимента согласуются с результатами расчетов.

1. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2793 (1996).
2. Xia J., Altucci C., Amoroso S., Bruzzese R., Velotta R., Wang X. *Opt. Express*, **16**, 3527 (2008).
3. Chen X., Zou J., Martin L., Lopez-Martens R., Audebert P. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **244**, 032002 (2010).
4. Nagy T., Forster M., Simon P. *Appl. Opt.*, **47**, 3264 (2008).
5. Andriukaitis G., Kartashov D., Lorenc D., Puglyš A., Baltuska A., Giniunas L., Danielius R., Limpert J., Clausnitzer T., Kley E., Voronin A., Zheltikov A. *Opt. Lett.*, **36**, 1914 (2011).
6. Hadrich S., Carstens H., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Express*, **19**, 7546 (2011).
7. Nagy T., Simon P. *Conf. Dig. on CLEO/Europe and EQEC 2011* (Munich, 2011, CD2\_3).
8. Bohman S., Suda A., Kaku M., Nurhuda M., Kanai T., Yamaguchi S., Midorikawa K. *Opt. Express*, **14**, 10684 (2008).
9. Vozzi C., Nisoli M., Sansone G., Stagira S., De Silvestri S. *Appl. Phys. B*, **80**, 285 (2005).
10. Pinault S.C., Potasek M.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **2**, 1318 (1985).
11. Marcatali E.A.J., Schmelzter R.A. *Bell Syst. Techn. J.*, **43**, 1783 (1964).