

# Явление уширения спектра и самокомпрессии отрицательно chirпированных фемтосекундных импульсов видимого диапазона в кварце

А.И.Аристов, Я.В.Грудцын, Л.Д.Михеев, А.В.Поливин, С.Г.Степанов,  
В.А.Трофимов, В.И.Яловой

Сообщается о наблюдении нового явления – уширения спектра и самокомпрессии отрицательно chirпированных фемтосекундных импульсов видимого диапазона при нелинейном взаимодействии широкоапертурных пучков с плавленным кварцем. Высказано предположение о вероятном механизме уширения спектра, заключающемся в совместном действии фазовой самомодуляции и четырехволнового смешения.

**Ключевые слова:** отрицательно chirпированный фемтосекундный импульс, самокомпрессия, фазовая самомодуляция, четырехволновое смешение.

Применение наиболее распространенных в настоящее время методов самокомпрессии на основе филаментации излучения в газах (см., напр., [1, 2]) и ионизационной самокомпрессии в газонаполненных капиллярах (см., напр., [3, 4]) пока ограничено сравнительно низкими уровнями энергии в импульсе (от нескольких мДж в первом случае до нескольких десятков мДж во втором). Поэтому поиск новых механизмов самокомпрессии фемтосекундного излучения, лишенных указанного недостатка, является актуальной задачей.

На рис.1 представлена схема эксперимента. Фемтосекундное излучение (длина волны  $\sim 475$  нм) формировалось в Ti:сапфировом комплексе «Старт 480М» с удвоением

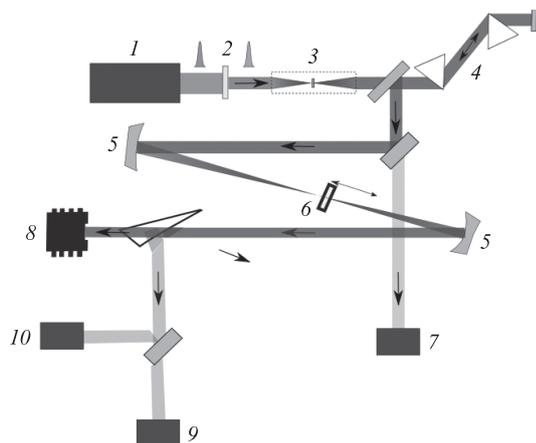


Рис.1. Схема эксперимента:

1 – Ti:сапфировый комплекс «Старт 480М»; 2 – кристалл KDP; 3 – пространственный фильтр; 4 – призменный стретчер; 5 – сферическое зеркало ( $R = 1200$  мм); 6 – кварцевая пластинка; 7 – спектрометр; 8 – калориметр; 9 – спектрометр; 10 – автокоррелятор.

А.И.Аристов, Я.В.Грудцын, Л.Д.Михеев, А.В.Поливин, С.Г.Степанов, В.И.Яловой. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: mikheev@sci.lebedev.ru  
В.А.Трофимов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 20 ноября 2012 г.

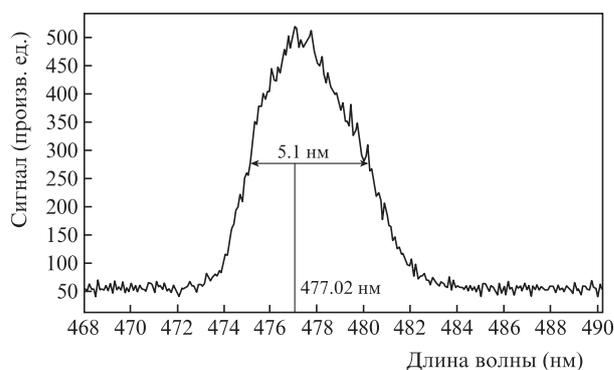


Рис.2. Спектр излучения после стретчера перед фокусировкой.

частоты (ООО «Авеста-Проект»). После пространственной фильтрации и стретчера на основе пары призм пучок диаметром 1 см по уровню  $1/e$  с шириной спектра излучения 5.1 нм (рис.2) фокусировался сферическим зеркалом ( $R = 1200$  мм) на образец. Форма импульса и квадратичная фаза отрицательно chirпированного импульса после стретчера измерялись в независимых экспериментах с помощью SPIDER-системы (рис.3). Образцом служила пластинка из УФ кварца толщиной 2.3 мм, которая устанавливалась за фокальной плоскостью на расстояниях 2.5, 3, 4 и 20 см от нее, при этом ширина пучка на образце

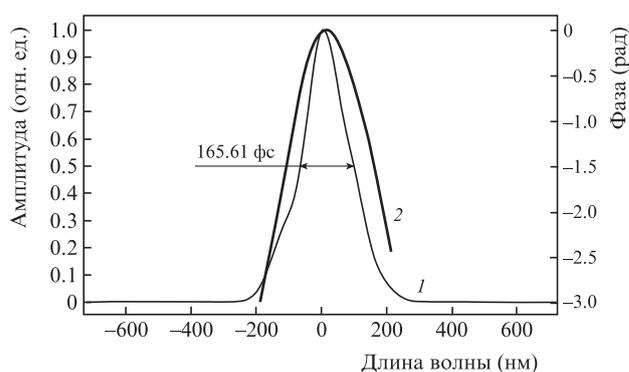


Рис.3. Форма импульса (1) и фаза (2) после стретчера, полученная с помощью SPIDER-системы.

по уровню интенсивности  $1/e$  составляла 0.42, 0.50, 0.66 и 3.3 нм, а интенсивности на образце были равны 1, 0.7, 0.4 и 0.015 ТВт/см<sup>2</sup> соответственно. В экспериментах измерялись энергия импульса ( $W = 0.2$  мДж), автокорреляционная функция и спектр излучения. Последние два параметра регистрировались в области максимальной интенсивности – в центре пучка.

Максимальная мощность лазерного пучка

$$P = \frac{W}{\sqrt{2\pi} \tau_0} = 1.2 \text{ ГВт}$$

была значительно меньше критической мощности для самофокусировки [5, 6]

$$P_{cr} = \frac{\pi(0.61)^2 \lambda^2}{8n_0 n_2} (1 + C^2) = 7 \text{ ГВт},$$

где  $C = -2$  – параметр чирпа;  $n_2 = 2.4 \times 10^{-23}$  м<sup>2</sup>/Вт – нелинейный показатель преломления воздуха [7]. Поэтому самофокусировка в области перетяжки пучка не наблюдалась. Вместе с тем взаимодействие с воздухом в этой области (диаметр перетяжки  $\sim 20$  мкм) приводило к дополнительному нелинейному набегу фазы ( $\sim 1.3$  рад). Однако это несущественно, т. к. набег фазы приводит к возникновению наблюдаемых эффектов при меньших толщинах образца.

Условия эксперимента выбирались таким образом, чтобы при всех интенсивностях сохранялось широкоапертурное приближение, когда длина самофокусировки  $L_{sf}$  существенно превышает толщину образца. Действительно, поскольку  $L_{sf} = \frac{1}{2} d [n_0 / (2n_2 I)]^{1/2}$  [5], где  $d = 0.4$  мм – минимальный диаметр пучка на образце при максимальной интенсивности  $I = 1$  ТВт/см<sup>2</sup> и  $n_2 = 3.3 \times 10^{-20}$  м<sup>2</sup>/Вт [8] – нелинейный показатель преломления для кварца, то  $L_{sf} > 1$  см.

На рис.4 показаны изменения спектра и длительности излучения в образце при разных интенсивностях  $I$ . Прежде всего заметим, что форма спектра исходного импульса после прохождения фокуса практически не менялась. Его ширина (4.8 нм) соответствует длительности спектрально ограниченного импульса гауссовой формы длительностью 70 фс. Длительность исходного отрицательно chirпированного импульса по полувысоте составляла 160 фс. Видно, что при  $I < 0.7 \times 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> происходит типичное сужение спектра, вызванное действием фазовой самомодуляции при распространении отрицательно chirпированного импульса в среде с положительной дисперсией групповых скоростей, а также небольшое сокращение длительности импульса за счет компенсации квадратичной фазы, внесенной призмной парой. При более высоких интенсивностях возникает сложная структура спектра и наблюдается временная самокомпрессия пучка до длительностей 40–50 фс, что существенно меньше длительности спектрально ограниченного импульса, отвечающего исходной ширине спектра. При этом с ростом интенсивности расстояние между пиками в спектре уменьшается. Так, для интенсивностей 0.4, 0.7 и 1.0 ТВт/см<sup>2</sup> расстояние между пиками составляет 4.7, 3.8 и 2.7 нм соответственно.

Одним из возможных объяснений наблюдаемого явления может быть совместное действие фазовой самомодуляции и четырехволнового смешения, причем фазовая самомодуляция действует на временную фазу отрицательно chirпированного импульса, в результате чего формируется модулированная структура спектра, а четырехволновое смешение приводит к усилению боковых компонент. В настоящее время эта гипотеза положена в основу более детальных экспериментальных и теоретических исследований.

Таким образом, в настоящей работе впервые обнаружено явление уширения спектра при нелинейном взаимодействии отрицательно chirпированных фемтосекундных

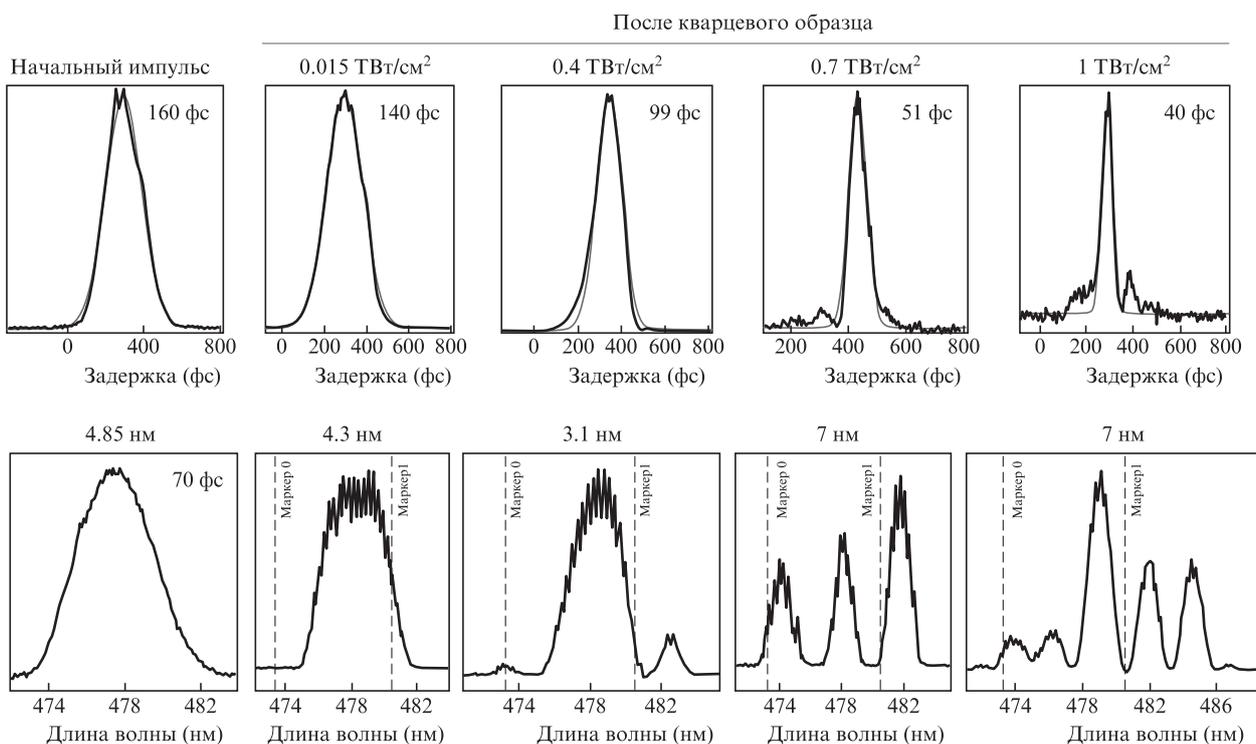


Рис.4. Автокорреляционные функции (вверху) и спектры излучения (внизу) до и после образца в зависимости от интенсивности падающего излучения.

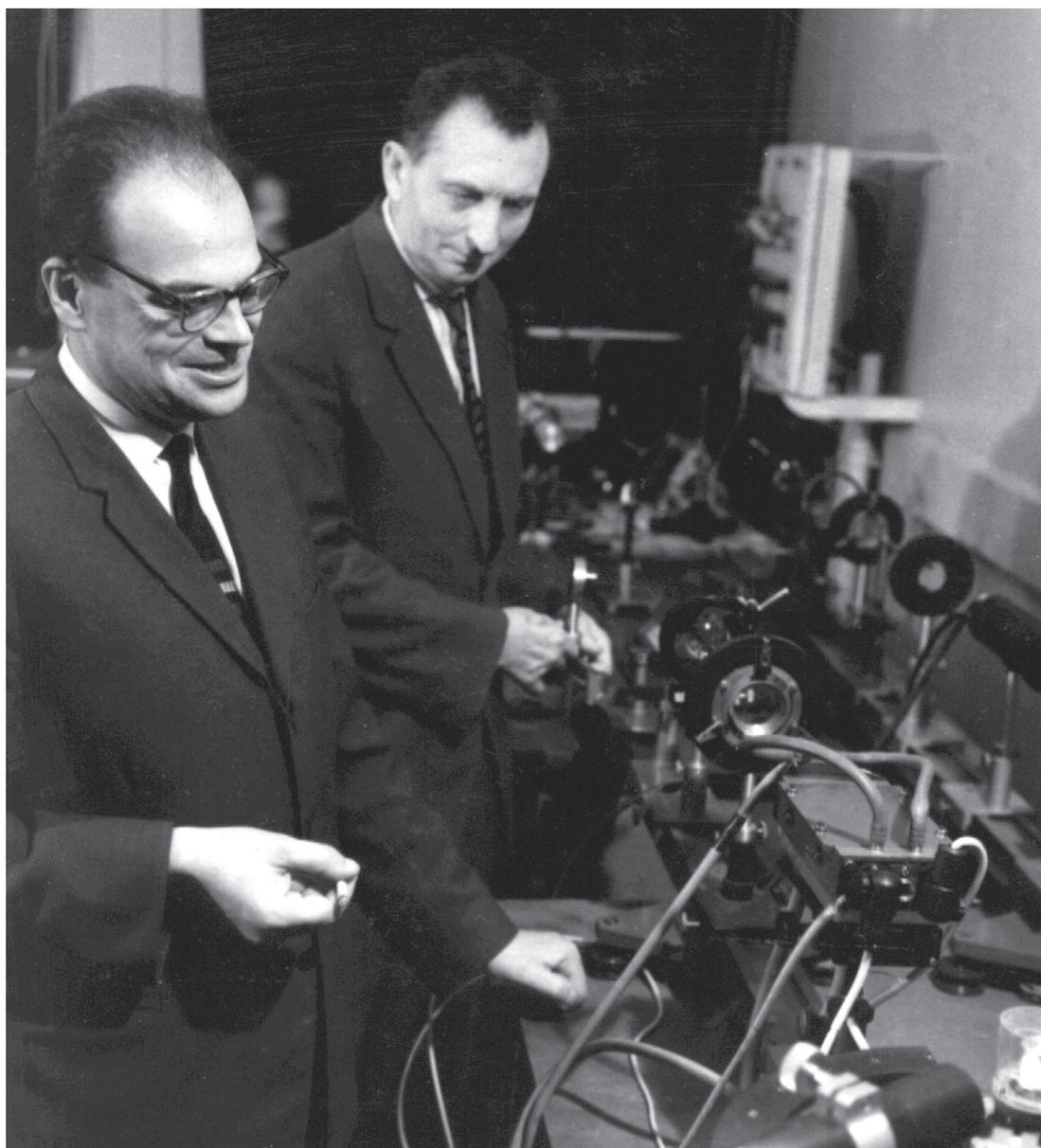
импульсов с оптическим материалом, обладающим нормальной дисперсией и кубической нелинейностью. При этом наблюдалась самокомпрессия фемтосекундных импульсов. Полученные результаты открывают перспективу разработки нового метода нелинейной самокомпрессии широкоапертурных пучков фемтосекундного излучения в оптических материалах, который свободен от физических ограничений на энергию в импульсе, характерных для известных методов самокомпрессии в филаментах и газонаполненных капиллярах. Очевидно, что такой метод может представить практический интерес для пучков с однородным пространственным распределением интенсивности.

Самокомпрессия отрицательно chirпированных фемтосекундных импульсов наблюдалась также в работе [9] при взаимодействии излучения на длине волны 800 нм со стеклом марки ВК-7. Интенсивность в этих экспериментах была в 1.6 раза выше, чем в наших исследованиях. Однако авторы наблюдали лишь небольшое сужение спектра и

изменение его формы от гауссовой к лоренцевой, отвечающей меньшей длительности спектрально ограниченного импульса. Различие результатов объясняется, видимо, более низкой эффективностью нелинейного самовоздействия в ИК диапазоне.

Авторы выражают признательность В.И.Ковалеву за полезные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» (Проект 1.3) и РФФИ (грант № 10-02-00121а).

1. Varela O. et al. *Opt. Lett.*, **35**, 3649 (2010).
2. Курилова М.В. и др. *Квантовая электроника*, **39**, 879 (2009).
3. Скобелев С.А. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **89**, 641 (2009).
4. Skobelev S.A. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 123904 (2012).
5. Boyd R.W. *Nonlinear Optics* (San Diego, CA: Academic, 1992).
6. Cao X.D. et al. *Phys. Rev. A*, **49**, 4085 (1994).
7. Lorient V. et al. *Opt. Express*, **17**, 13429 (2009).
8. Miliam D., *Appl. Opt.*, **37**, 546 (1998).
9. Liu J. et al. *Opt. Express*, **14**, 979 (2006).



Н.Г.Басов и А.М.Прохоров у лазера