

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК «ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ»

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Сжатие после компрессора: трехкратное уменьшение длительности лазерных импульсов мощностью 200 ТВт

В.Н.Гинзбург, И.В.Яковлев, А.С.Зуев, А.П.Коробейникова, А.А.Кочетков, А.А.Кузьмин, С.Ю.Миронов, А.А.Шайкин, И.А.Шайкин, Е.А.Хазанов

Экспериментально продемонстрировано сжатие с 63 до 21 фс импульса с энергией 12 Дж при диаметре пучка излучения 18 см. Сжатие осуществлено при свободном распространении импульса в стекле в условиях фазовой самомодуляции и последующей компенсации дисперсии при отражении от дисперсионных зеркал. Этот простой и дешевый метод кратного увеличения мощности импульса имеет практически 100%-ный КПД по энергии и может быть использован на выходе любых сверхмощных лазеров, причем без внесения каких-либо изменений в их оптическую схему.

Ключевые слова: фазовая самомодуляция, сжатие фемтосекундных импульсов, мультитераваттная лазерная система.

1. Введение

Буквально через несколько лет после создания в 1960 г. первого лазера интенсивность лазерного излучения достигла 10^{14} Вт/см², но в последующие 20 лет она практически не росла. Открытие в 1985 г. [1] метода CPA (Chirped-Pulse Amplification) привело к резкому росту мощности лазеров: в 2004 г. рекордная интенсивность достигла 10^{22} Вт/см² [2]. Однако до сих пор новых рекордов не появилось. Это связано с тем, что мощность ограничивается уже не усилительной частью CPA-системы, а компрессором, порог пробоя дифракционных решеток которого и определяет интенсивность лазерного излучения (см., напр., [3]). Таким образом, в цепочке стретчер–усилитель–компрессор самым слабым звеном стал компрессор. Возможны три пути увеличения мощности лазеров. Во-первых, использование мозаичных (составных) решеток в компрессоре. Во-вторых, создание сфазированных параллельных CPA-каналов, каждый из которых «заканчивается» собственным компрессором. Эти два подхода имеют ряд существенных недостатков: кратное увеличение энергии импульса, сложности реализации, габариты и стоимость. От этих недостатков свободен третий подход, в котором мощность увеличивается не за счет роста энергии, а вследствие уменьшения длительности импульса: импульс сжимается после компрессора. Этот метод получил название CafCA (Compression after Compressor Approach) [4]. Для этого (см. рис.1) спектр импульса при его распространении в среде с кервовой самоиндуцированной нелинейностью расширяется благодаря фазовой самомодуляции (ФСМ), а затем импульс сжимается дисперсионными зеркалами.

Идею использования кубической нелинейности для ФСМ в 1969 г. предложил Роберт Фишер с соавторами

В.Н.Гинзбург, И.В.Яковлев, А.С.Зуев, А.П.Коробейникова, А.А.Кочетков, А.А. Кузьмин, С.Ю.Миронов, А.А.Шайкин, И.А.Шайкин, Е.А.Хазанов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: khazan@appl.sci-nnov.ru, efimkhazanov@gmail.com

Поступила в редакцию 11 марта 2019 г.

[5]. В том же году [6] было продемонстрировано сжатие импульса длительностью 20 пс в несколько раз при ФСМ в кювете с CS₂. Позднее, уже в фемтосекундном диапазоне, ФСМ была реализована в волокне [7], в заполненном газом полых волноводах [8] и в ограниченном в поперечном направлении объеме [9], однако компрессия была получена лишь для импульсов с энергией порядка миллиджоулей, т. к. во всех этих экспериментах диаметр пучка был менее 1 мм. Ограничение масштабирования энергии связано с пространственной неоднородностью пучка, которая несущественна при волноводном распространении, но принципиальна при распространении в свободном пространстве. Метод CafCA получил развитие применительно к значительно более мощным лазерам, обладающим квазиоднородным распределением интенсивности излучения. В 2011 г. [10] экспериментально наблюдалось кратное уширение спектра импульса второй гармоники при энергии 4.7 мДж и диаметре пучка 3 мм. За последние несколько лет был получен ряд экспериментальных результатов [11–15], в которых метод CafCA успешно реализован для пучков с энергией в диапазоне 20 мДж–5.5 Дж. Важным мотивом этих исследований стал предложенный и экспериментально подтвержденный способ подавления мелкомасштабной самофокусировки [16], позволяющий существенно увеличить кратность компрессии, а также идея [17] использования в качестве нелинейной среды полимерных материалов (пластик). Рекордный до сегодняшнего дня результат получен именно с использованием пластика: импульс с энергией 5.5 Дж и длительностью 57 фс сжат до 22 фс [13].

В настоящей работе мы сообщаем о следующем шаге, сделанном в направлении масштабирования CafCA: на полной (18 см) апертуре пучка излучения лазера мощностью 200 ТВт экспериментально продемонстрировано трехкратное сжатие импульса с энергией 12 Дж.

2. Результаты экспериментов

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис.1. Пучок излучения лазера PEARL (центральная длина волны 920 нм, диаметр 18 см) с энергией импульса

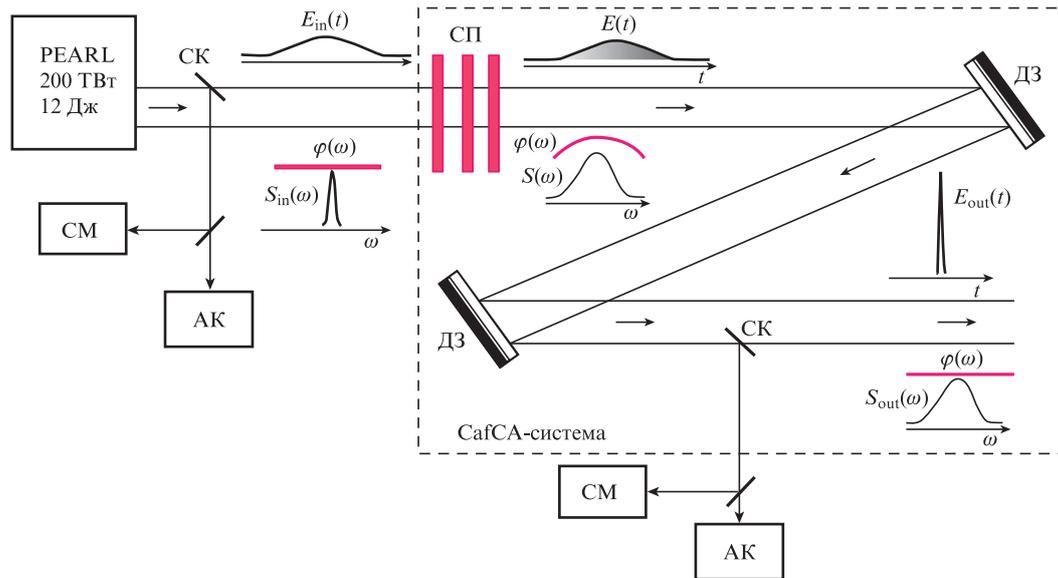


Рис.1. Схема эксперимента:

СП – стеклянные пластинки; ДЗ – дисперсионные зеркала; СК – стеклянные клинья малой апертуры; АК – автокорреляторы; CM – спектрометры.

10–15 Дж и его длительностью 50–70 фс после отражения от последней дифракционной решетки компрессора распространялся на расстояние 2.5 м в свободном пространстве для самофилтрации [16]. После этого он последовательно проходил через три пластинки из стекла толщиной 1 мм каждая, расстояние между которыми было около 1 см. Использование трех пластинок вместо одной, толщиной 3 мм, позволяло уменьшать мелкомасштабную самофокусировку. Затем, после свободного распространения на расстояние 4 м, пучок отражался от двух дисперсионных зеркал диаметром 20 см производства UltraFast Innovations GmbH (дисперсия каждого зеркала была равна -100 фс^2 , коэффициент отражения превышал 99%). Для измерения параметров входного и выходного импульсов в пучок были введены два стеклянных клина с апертурой $1 \times 2 \text{ см}$ и матированной тыльной поверхностью: один – перед стеклянными пластинками, другой – после дисперсионных зеркал. Отраженные от клиньев пучки направлялись на два спектрометра и два автокоррелятора. Пучок излучения лазера PEARL был достаточно однороден по сечению, поэтому в отсутствие стеклянных пластинок спектры и длительности входного и выходного импульсов совпадали с точностью до 10%. Таким образом,

была реализована возможность измерения характеристик излучения за один «выстрел».

Измеренные спектры и автокорреляционные функции (АКФ) интенсивностей обоих импульсов представлены на рис.2 для импульса с энергией 12 Дж (интенсивность $\sim 1.1 \text{ ТВт/см}^2$, накопленный в трех пластинках B -интеграл ~ 6) сплошными кривыми. По измеренным спектрам мы подобрали формы импульсов, АКФ которых наиболее близко соответствовали измеренным АКФ. Их формы и АКФ показаны на рис.2 пунктирными кривыми. Для подобранной формы входного импульса мы теоретически рассчитали параметры выходного импульса, представленные на рис.2 штриховыми кривыми.

Из рис.2,а видно, что спектр выходного импульса значительно уширяется и в нем появляются узкие пики, характерные для спектров не спектрально-ограниченных импульсов после ФСМ (подробнее см. [18]). Качественно расчетный и экспериментальный спектры совпадают, хотя количественно ширины и амплитуды пиков различаются.

Ширины на полувысоте экспериментально измеренных АКФ на входе (93 фс) и на выходе (31 фс) SafCA-системы различаются в три раза (рис.2,б), тогда как АКФ теоретически рассчитанного импульса укорачивается в

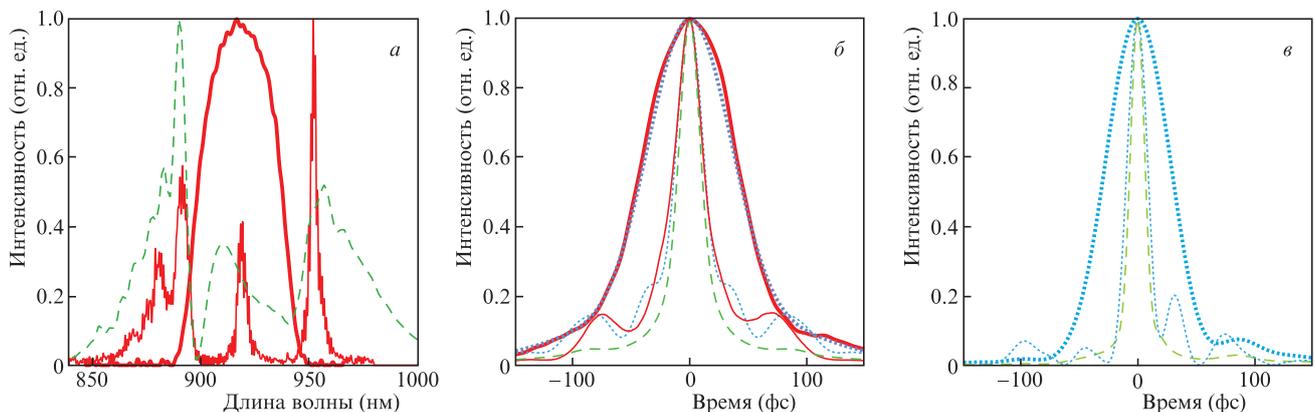


Рис.2. Спектры (а), АКФ (б) и формы импульсов (в) на входе (толстые кривые) и на выходе (тонкие кривые) SafCA-системы. Экспериментальные данные представлены сплошными кривыми, теоретические – штриховыми, подобранные (см. текст) – пунктирными.

четыре раза. Видимо, это объясняется тем, что экспериментальный спектр выходного импульса уже теоретического. Длительность импульса на полувисоте также уменьшается в три раза – с 63 ± 3 до 20.5 ± 2.5 фс, хотя расчет предсказывает четырехкратное укорочение (рис.2,в). Одной из возможных причин расхождения с теорией является обужение спектра в измерительном тракте нашей установки из-за больших потерь в транспортной оптике излучения с длинами волн больше 955 нм. Подробному сравнению теоретических и экспериментальных данных будет посвящена отдельная публикация.

Таким образом, приведенные результаты демонстрируют возможность трехкратного сжатия импульса мощностью 200 ТВт с помощью нелинейной компрессии. Этот метод (CafCA) обладает тремя несомненными достоинствами. Во-первых, простотой и дешевизной: требуются только плоскопараллельная пластинка и одно или несколько дисперсионных зеркал, технология изготовления которых хорошо развита. Во-вторых, возможностью его использования для практически любых сверхмощных лазеров, причем без какой-либо переделки самих лазеров. В-третьих, высокой эффективностью: потери энергии с учетом возможности установки пластинки под углом Брюстера, а также использования дисперсионных зеркал с коэффициентом отражения более 99.6%, не превышают 1%.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» и государственного задания ИФП РАН (проект № 0035-2014-0016).

1. Strickland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
2. Bahk S.-W., Rousseau P., Planchon T.A., Chvykov V., Kalintchenko G., Maksimchuk A., Mourou G.A., Yanovsky V. *Opt. Lett.*, **29**, 2837 (2004).
3. Яковлев И.В. *Квантовая электроника*, **44**, 393 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 393 (2014)].
4. Danson C., Bromage J., Butcher T., Chanteloup J.-C., Chowdhury E., Galvanauskas A., Gizzi L., Haefner C., Hein J., Hillier D., Hopps N., Kato Y., Khazanov E., Kodama R., Korn G., Li R., Li Y., Limpert J., Ma J., Nam C.H., Neely D., Papadopoulos D., Penman R., Qian L., Rocca J., Shaykin A., Siders C., Spindloe C., Sztamári S., Trines R., Zhu J., Zhu P., Zuegel J. *High Power Laser Sci. Eng.*, to be published (2019).
5. Fisher R.A., Kelley P.L., Gustajson T.K. *Appl. Phys.Lett.*, **14**, 140 (1969).
6. Laubereau A. *Phys. Lett.*, **29A**, 539 (1969).
7. Shank C.V., Fork R.L., Yen R., Stolen R.H., Tomlinson W.J. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 761 (1982).
8. Nisoli M., Silvestri S.D., Svelto O. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2793 (1996).
9. Rolland C., Corkum P.B. *J. Opt. Soc. Am. B*, **5**, 641 (1988).
10. Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Кирсанов А.В., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. *Квантовая электроника*, **41**, 963 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 963 (2011)].
11. Mironov S., Lassonde P., Kieffer J.C., Khazanov E., Mourou G. *Euro. Phys. J. – Special Top.*, **223**, 1175 (2014).
12. Lassonde P., Mironov S., Fourmaux S., Payeur S., Khazanov E., Sergeev A., Kieffer J.-C., Mourou G. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 075401 (2016).
13. Миронов С.Ю., Уилер Д., Гонин Р., Кожокару Г., Унгуреану Р., Баници Р., Сербанеску М., Дабу Р., Муру Ж., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **47**, 173 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 173 (2017)].
14. Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Яковлев И.В., Кочетков А.А., Шайкин А.А., Хазанов Е.А., Муру Ж. *Квантовая электроника*, **47**, 614 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 614 (2017)].
15. Farinella D.M., Wheeler J., Hussein A.E., Nees J., Stanfield M., Beier N., Ma Y., Cojocaru G., Ungureanu R., Pittman M., Demailly J., Baynard E., Fabbri R., Masruri M., Secareanu R., Naziru A., Dabu R., Maksimchuk A., Krushelnick K., Ros D., Mourou G., Tajima T., Dollar F. *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, A28 (2019).
16. Mironov S.Y., Lozhkarev V.V., Ginzburg V.N., Yakovlev I.V., Luchinin G., Shaykin A.A., Khazanov E.A., Babin A.A., Novikov E., Fadeev S., Sergeev A.M., Mourou G.A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **18**, 7 (2010).
17. Mironov S., Gacheva E., Ginzburg V., Silin D.E., Kochetkov A., Mamaev Y., Shaykin A., Khazanov E., Mourou G. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 025301 (2015).
18. Гинзбург В.Н., Кочетков А.А., Яковлев И.В., Миронов С.Ю., Шайкин А.А., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **46**, 106 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 106 (2016)].