

Тераваттный фемтосекундный титан-сапфировый лазерный комплекс*

А.А.Бабин, А.М.Киселев, А.М.Сергеев, А.Н.Степанов

На основе наиболее перспективной в настоящее время широкополосной лазерной среды – сапфира, активированного ионами Ti, создан фемтосекундный лазерный комплекс тераваттной мощности. Получены следующие параметры выходного излучения: длительность импульса ~ 80 фс, энергия в импульсе ~ 80 мДж, частота следования 10 Гц. В качестве демонстрации возможностей комплекса приводятся первые экспериментальные результаты – модификация прозрачных диэлектриков в виде протяженных каналов с аспектным отношением ~ 10⁴ при аксиальной фокусировке и трансформация спектра импульса при распространении в газонаполненных капиллярах низкого давления.

Ключевые слова: фемтосекундный световой импульс, тераваттная лазерная система, сверхсильные электромагнитные поля.

За последнее десятилетие произошло формирование одного из интереснейших и перспективных направлений современной физики – исследования взаимодействия сверхсильных оптических полей с веществом на сверхкоротких временных интервалах. Прогресс в этом направлении во многом обусловлен созданием компактных тераваттных фемтосекундных лазерных комплексов на основе новых твердотельных широкополосных активных сред типа Ti:Al₂O₃ (Ti:Sa). Такие лазерные комплексы становятся экспериментальной базой для развития новых направлений и приложений в атомной физике, термоядерных исследованиях, физике ускорителей заряженных частиц, технике прецизионной обработки материалов, в исследованиях по сверхкороткоимпульсным источникам и лазерам рентгеновского и УФ диапазонов.

В настоящее время в мире существует несколько фемтосекундных лазерных комплексов с пиковой мощностью более 10¹³ Вт (мультитераваттные системы) и интенсивностью излучения до 10²⁰ Вт/см² [1–5]. Помимо значительного влияния на развитие новых научных направлений, создание таких комплексов является демонстрацией престижа национальной науки и служит своеобразным свидетельством передового уровня технологий в стране.

В настоящей работе кратко описан созданный в ИПФ РАН (Нижний Новгород) тераваттный фемтосекундный Ti:Sa-лазерный комплекс, позволяющий получать лазерные импульсы с длительностью ~ 100 фс, энергией ~ 100 мДж, интенсивностью сфокусированного излучения более 10¹⁸ Вт/см² и частотой повторения 10 Гц.

Идеология построения лазерного комплекса является

традиционной [6] и заключается в генерации лазерных импульсов фемтосекундного диапазона длительностей, их последующем временном растяжении, усилении фазово-модулированных (чирпированных) волновых пакетов в системе широкополосных оптических усилителей и заключительном восстановлении исходного временного профиля сверхкороткого светового импульса. Данный принцип получения сверхсильных оптических полей используется во всех без исключения лазерных комплексах, созданных к настоящему времени. Блок-схема такого фемтосекундного лазерного комплекса приведена в [7] и полностью отражает изложенную выше идеологию. Кратко остановимся на принципиальных элементах этой схемы.

Задующий генератор представляет собой Ti:Sa-лазер с пассивной синхронизацией мод за счет керровского механизма. Принципиальную схему такого генератора сейчас можно найти в многочисленных публикациях, посвященных фемтосекундным лазерам (см., напр., [8, 9]). Резонатор лазера длиной ~ 3 м образован плоскими диэлектрическими зеркалами, внутри которых установлена пара вогнутых зеркал (радиус кривизны ~ 100 мм). Эти зеркала образуют близкий к конфокальному разъюстированный резонатор, в центре которого расположен брюстеровский активный элемент длиной ~ 1 см. Плоские зеркала (выходное и глухое) замыкают внутренний «конфокал», образуя собственно резонатор лазера. Компенсатор дисперсии в виде двух брюстеровских призм, разнесенных на определенное расстояние и установленных вершинами в противоположные стороны, расположен около глухого зеркала. Расстояние между вершинами призм рассчитывается исходя из условия компенсации материальной дисперсии второго порядка для активного элемента длиной 1 см [10]. Углы между осью «конфокала» и выходящими из него лучами выбираются из условия компенсации астигматизма [11], вносимого плоскопараллельной пластиной брюстеровского активного элемента.

В качестве накачки фемтосекундного лазера используется пространственно-одномодовое (мода TEM_{00q}) из-

*По материалам доклада на семинаре «Сверхбыстрые процессы в веществах и лазерные фемтотехнологии» (Н.Новгород, Институт прикладной физики РАН, 7–8 декабря 2000 г.).

лучение второй гармоники непрерывного твердотельного лазера. Это излучение фокусируется в активный элемент таким образом, чтобы поперечный размер пучка накачки в перетяжке был немного меньше минимального размера основной моды резонатора лазера. Каустика «конфокала» должна быть продольно совмещена с этой перетяжкой. Данные условия являются необходимыми для реализации керровского механизма синхронизации мод в Ti:Sa-лазере.

Порог непрерывной генерации в нашем случае (при коэффициенте пропускания выходного зеркала 80 % и длине активного элемента 10 мм) составил 1.5–2 Вт. Порог перехода в режим синхронизации мод оказался равным ~3 Вт. Устойчивая генерация фемтосекундных импульсов наблюдалась вплоть до максимально возможной мощности лазера накачки (5.5 Вт). При этом средняя мощность выходного излучения доходила до 600–700 мВт при частоте следования импульсов ~80 МГц, а длительность импульса составила ~80 фс. Переход от непрерывного режима к импульсному осуществлялся при резком поперечном перемещении одной из призм компенсатора дисперсии. Стабильный фемтосекундный режим генерации лазера существовал на протяжении нескольких часов, что позволяло настраивать всю оптическую схему комплекса и проводить эксперименты с исследуемыми объектами.

Стретчер является устройством, производящим сильное (на 3–4 порядка) временное растяжение исходного фемтосекундного импульса за счет фазовой модуляции распространяющегося через него короткого волнового пакета. По существу, в этом элементе, обладающем сильной нормальной дисперсией, сверхкороткий световой импульс приобретает монотонное изменение несущей внутри своей огибающей (чирп). В результате огибающая исходного лазерного импульса удлиняется и, соответственно, уменьшается пиковая мощность сигнала. Именно идея усиления чирпированных оптических импульсов, высказанная впервые в [6], и позволила создать компактные лазерные источники сверхсильных электромагнитных полей.

В качестве элемента с сильной дисперсией используются дифракционные решетки. Существует несколько конструкций стретчера (см., напр., [12, 13, 14]), однако нам представляется наиболее удобной в настройке и эксплуатации схема, использующая одну дифракционную решетку (1600 штр./мм, угол падения близок к автоколлимационному) и дополнительное плоское зеркало, установленное в фокальной плоскости сферического зеркала, которое возвращает первично дифрагировавший пучок обратно на ту же решетку для вторичной дифракции. Помимо удобства в настройке такая схема стретчера позволяет исключить большеапертурные ахроматические линзы, применяемые в традиционной схеме, и использовать только одну решетку. Максимальный коэффициент временного растяжения импульса определяется, как известно, линейным размером решетки L в плоскости дифракции и для нашей схемы (при $L = 100$ мм) составляет $3 \cdot 10^3$, что отвечает длительности импульса около 200 пс.

Фарадеевская развязка выполняет одновременно две задачи: устраняет обратное влияние усилительной системы на задающий генератор и направляет усиленное после регенеративного усилителя излучение в систему оконечных усилителей. В ее состав входят оптический вентиль Фарадея на постоянных магнитах, широкопо-

лосные поляризаторы и фазовые пластинки, поворачивающие поляризацию пучка.

Регенеративный оптический усилитель представляет собой Ti:Sa-лазер с инъекцией внешнего сигнала, накачиваемый излучением второй гармоники импульсно-периодического Nd:YAG-лазера и имеющий внутри своего резонатора быстрый (со временем переключения не более 2 нс) электрооптический затвор для вывода одиночного усиленного импульса. Используемый в регенераторе активный элемент имеет те же размеры, что и в задающем фемтосекундном генераторе.

Излучение лазера накачки (энергия в импульсе ~10–12 мДж) фокусируется в активный элемент таким образом, чтобы его поперечный размер совпадал с размером основной моды резонатора регенератора. Если вход регенеративного усилителя заблокирован (режим свободной генерации) и энергия не выводится из резонатора, регенератор работает как обычный лазер и излучает импульс длительностью несколько сотен наносекунд. Этот режим работы мы использовали для юстировки всех оконечных усилителей и исследуемого объекта.

При подаче на вход усилителя чирпированного импульса с выхода стретчера и выключенном затворе выходящее излучение представляет собой периодическую последовательность коротких импульсов. Период повторения определяется временем обхода резонатора регенератора световым импульсом (длины резонаторов задающего генератора и регенеративного усилителя приблизительно одинаковы).

Максимум огибающей этой последовательности импульсов при оптимальной настройке усиливаемого сигнала смещается на $\Delta t \sim 150 - 200$ нс по сравнению с максимумом импульса в режиме свободной генерации. Следовательно, время развития генерации уменьшается на Δt , поскольку генерация развивается с уровня инжектируемого сигнала, а не с уровня квантовых флуктуаций, что имеет место в режиме свободной генерации. Это позволяет экспериментально определять оптимальный момент времени для вывода усиленного импульса.

Для наших условий оптимальное число полных проходов импульса по резонатору оказалось равным ~30, а выходная энергия усиленного импульса при этом равнялась 1.2–1.5 мДж. Таким образом, коэффициент усиления регенеративного усилителя по энергии составил примерно 10^6 . Поперечная структура выходного излучения полностью определялась основной модой резонатора регенератора, а пучок излучения, соответственно, был дифракционно-ограниченным.

Частота повторения усиленных импульсов задавалась частотой повторения импульсов лазера накачки (10 Гц). Работой регенеративного усилителя управляла система синхронизации, которая определяла момент инъекции одного из импульсов периодической последовательности импульсов задающего фемтосекундного лазера в резонатор регенератора и момент его вывода после усиления. Внутренними «часами» системы синхронизации служила последовательность фемтосекундных импульсов, излучаемая задающим генератором. Временная нестабильность момента вывода усиленного в регенераторе оптического импульса относительно импульса накачки (джиттер) составила не более половины периода повторения $T \sim 12$ нс. Это обстоятельство оказалось вполне удовлетворительным при дальнейшем усилении оптических импульсов в оконечных каскадах, которые

накачивались излучением второй гармоники того же самого Nd:YAG-лазера, поскольку время жизни инверсии населенности Ti:Sa-активных элементов составляет несколько микросекунд.

Усилители для дальнейшего увеличения энергии оптического импульса выполнялись по четырех- и трехпроходным схемам. Их активными элементами служили бростеровские Ti:Sa-элементы диаметром 10 мм и длиной 15 мм. В качестве накачки четырехпроходного усилителя, как уже отмечалось, использовалось излучение второй гармоники того же Nd:YAG-лазера, которое служило накачкой регенератора. Пространственная структура излучения этого лазера была близкой к гауссовой лишь в ближней зоне, поэтому нам пришлось строить систему переноса изображения (с уменьшением) данной зоны на вход усилительного элемента. Этим достигалось достаточно гладкое пространственное распределение накачки на входных торцах усилительного кристалла, что значительно снижало лучевую нагрузку.

Для дополнительного уменьшения лучевой нагрузки на активный элемент усилителя пучок накачки разделялся на две части с примерно равной энергией в импульсах, и оба эти пучка подавались на кристалл усилителя навстречу друг другу. Размеры обоих пучков выбирались таким образом, чтобы плотность энергии на входных поверхностях элемента не превышала 4 Дж/см². Эта величина (судя по литературе и нашему опыту) соответствует безопасному с точки зрения оптического разрушения режиму работы усилителя. Соответственно поперечный размер пучка усиливаемого сигнала согласовывался с помощью линзового телескопа с сечением пучка накачки.

Максимальная энергия в импульсе, полученная при энергии накачки ~200 мДж, не превышала 50 мДж. При этом необходимо отметить, что поперечная структура усиленного пучка слегка искажалась, в результате чего расходимость пучка на выходе из четырехпроходного усилителя примерно в 1.4 раза превышала дифракционную.

Оконечный усилитель мощности выполнен по трехпроходной схеме. Для его накачки использовалась дополнительная оптическая лазерная система с удвоением частоты, позволившая получить на выходе (в ближней зоне) гладкое пространственное распределение излучения при энергии импульса ~1 Дж, жестко привязанного во времени к исходному импульсу.

Для накачки кристалла окончного усилителя здесь также применялась система переноса изображения ближней зоны и, аналогично предыдущему случаю, излучение подавалось на кристалл с двух сторон. Плотность энергии накачки в рассматриваемом случае также не превышала 4 Дж/см², и поперечные размеры пучков усиливаемого сигнала и накачки были согласованы. По расчетам, энергетика накачки было достаточно для получения энергии с выхода окончного усилителя ~200–220 мДж, однако в эксперименте мы получили менее 200 мДж в выходном импульсе. Это несоответствие связано, возможно, с неидеальным пространственным согласованием пучков накачки и усиливаемого сигнала в активной среде.

Компрессор является необходимым элементом тераваттного комплекса, осуществляющим восстановление временной формы исходного фемтосекундного импульса. Это устройство представляет собой линейную систему с сильной аномальной дисперсией. Для идеального

восстановления исходной формы фемтосекундного импульса необходимо знать частотную зависимость набега фазы $\Phi(\omega)$ усиленного chirпированного импульса по всей трассе до компрессора.

Решеточный компрессор позволяет компенсировать лишь наиболее существенные квадратичное и кубичное слагаемые в разложении $\Phi(\omega)$ в ряд Тейлора в окрестности центральной частоты ω_0 , поскольку он имеет два свободных параметра – расстояние между решетками и угол падения на первую из них. В силу этого обстоятельства полного восстановления временной формы огибающей после компрессора не происходит, в импульсе сохраняется остаточная фазовая модуляция, что приводит к его растяжению по сравнению с исходным импульсом, а также к возникновению «крыльев».

В принципе, в настоящее время существует возможность компенсации более высоких, чем третье, слагаемых в разложении $\Phi(\omega)$ и, соответственно, более точного восстановления исходного импульса за счет, например, оптических элементов (зеркал) с управляемой дисперсией [15]. Однако, помимо сложности и большой стоимости изготовления таких элементов, измерение фазовых характеристик оптического импульса, необходимых для такой компенсации, также представляет собой непростую задачу.

В нашем комплексе использована однорешеточная конструкция компрессора, более простая в настройке и эксплуатации. Вместо второй решетки мы применяли уголкового отражатель, возвращающий (в плоскости дифракции) излучение после первичного дифрагирования вновь на ту же решетку для вторичного отражения. Второй уголкового отражатель, установленный в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции, направлял излучение обратно и выводил сжатый во времени импульс из компрессора. Суммарный коэффициент пропускания компрессора по энергии оказался равным 50 % и определялся, в основном, недостаточным большим коэффициентом отражения используемой решетки. Таким образом, как следует из рис.1, созданный фемтосекундный комплекс позволяет получать импульс длительностью ~100

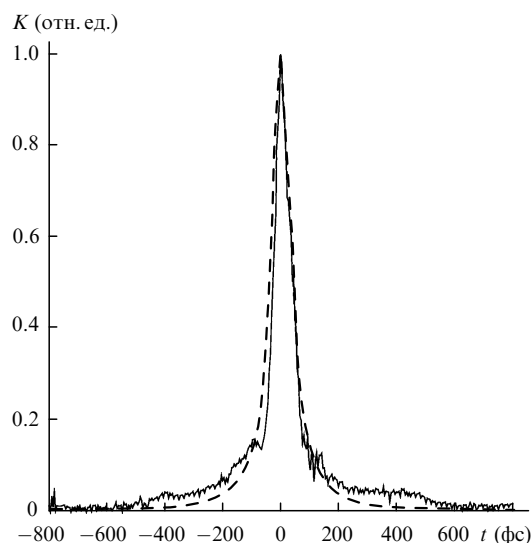


Рис.1. Одноимпульсная автокорреляционная функция интенсивности выходного излучения системы (сплошная кривая) и ее лоренцевская аппроксимация с полушириной 80 фс (штриховая кривая) при энергии в импульсе 80 мДж.

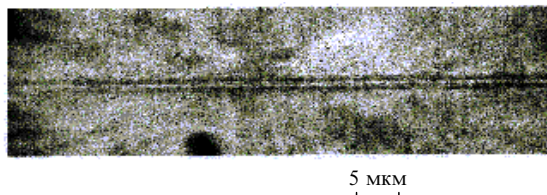


Рис.2. Канал в кварце, полученный при аксиальной фокусировке одиночного фемтосекундного импульса с энергией ~ 10 мДж и диаметре входного пучка 1 см.

фс при выходной энергии ~ 0.1 Дж, т. е. пиковая мощность импульса составляет 10^{12} Вт.

Рассмотрим некоторые применения тераваттного фемтосекундного комплекса. На созданном лазерном комплексе проведен цикл экспериментов по модификации структуры прозрачных диэлектриков в полях сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов с целью изучения возможных его приложений для микрообработки материалов. В частности, впервые в мире продемонстрировано создание микроструктур диаметром ~ 1 мкм в объеме вещества с аспектным отношением до 10^4 (см. рис.2 [7]). Этот результат представляет большой интерес для обработки сверхтвердых (например, алмазоподобных) материалов, создания элементной базы интегральной и рентгеновской оптики, искусственных сред с характеристиками фотонных кристаллов и т. п.

В настоящее время получены первые результаты по исследованию каналирования мощных УКИ в газонаполненных микрокапиллярах при одномодовом распространении в присутствии лазерной плазмы. Одной из целей этих работ является оптимизация параметров лазерной плазмы для создания эффективных источников рентгеновского излучения и плазменных волн большой амплитуды для ускорения электронов. Другая цель – получение сверхширения спектра ионизирующего лазерного импульса в капилляре и последующее сжатие импульса до субфемтосекундных длительностей. Характерные экспериментальные спектральные распределения мощного фемтосекундного излучения, поступающего в наполненный инертным газом капилляр и прошедшего через него, приведены на рис.3. Видно, что действительно происходит существенное уширение спектра падающего излучения в коротковолновую сторону. Результаты теоретического анализа этого явления, основанные на модели одномодового распространения мощного сверхкороткого импульса с учетом ионизации газа, качественно соответствуют экспериментальным наблюдениям.

Авторы благодарят за финансовую поддержку работы РАН, Министерство промышленности, науки и технологий РФ и РФФИ (гранты № 96-02-18940, 98-02-

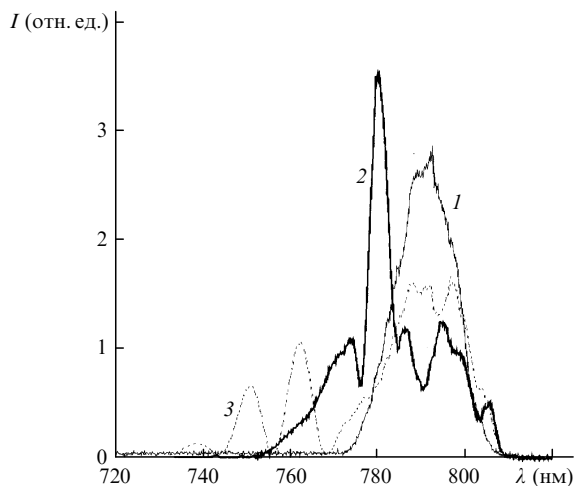


Рис.3. Спектры излучения I на выходе из пустого капилляра (1) и из капилляров, заполненных Ag при давлении 1 Тор, при энергии входного излучения 2.4 (2) и 11.8 мДж (3). Диаметр капилляра 100 мкм, длина 20 см.

17013). Считаю также своим приятным долгом выразить благодарность за помощь при создании фемтосекундного комплекса сотрудникам ИПФ РАН Ю.А.Мамаеву, Ю.Н.Коноплеву, Н.Ф.Андрееву, Е.А.Хазанову, О.В.Палашову, Д.В.Карташову, В.В.Ложкареву, А.В.Кирсанову и К.И.Правденко.

1. Sillavan A. et al. *Optics Letts*, **16**, 1408 (1991).
2. Barty C.P.J., Gordon III C.L., Lemoff B.E. *Optics Letts*, **19**, 1442 (1994).
3. Blanchot N., Rouyer C., Sauteret C., Migus A. *Optics Letts*, **20**, 395 (1995).
4. Key M.H. et al. *Phys. Plasmas*, **5**, 1966 (1998).
5. Wang H. et al. *J. Opt. Soc. Amer. B*, **16**, 4615 (1997).
6. Stricland D., Mourou G. *Optics Comms*, **56**, 212 (1985).
7. Бабин А.А., Киселев А.М., Правденко К.И., Сергеев А.М., Степанов А.Н., Хазанов Е.А. *УФН*, **169**, 80 (1999).
8. Salin F., Squier J., Piche M. *Optics Letts*, **16**, 1674 (1991).
9. Siders C.W., Gaul E.W., Downer M.C., Babin A.A., Stepanov A.N. *Rev. Sci. Instr.*, **65**, 3140 (1994).
10. Fork R.L., Cruz C.H.V., Becker P.C., Shank C.V. *Optics Letts*, **12**, 473 (1987).
11. Kogelnic H.W., Ippen E.P., Dienes A., Shank C.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **8**, 373 (1972).
12. Ахманов С.А., Высоух В.А., Чиркин А.С. *Оптика фемтосекундных импульсов* (М., Наука, 1988).
13. Martinez O.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 1385 (1987).
14. Крюков П.Г. В сб. *Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства* (М., изд-е Учебно-научного центра волоконно-оптических материалов и устройств, 1999, № 2, с. 63).
15. Szpoc R., Ferencz K., Spilman C., Krausz F. *Optics Letts*, **19**, 201 (1994).