

УДК 621.373.8

Результаты исследований мощной лазерной системы видимого диапазона THL-100

С.В. Алексеев, В.Ф. Лосев, А.Г. Ястремский*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

Приведены результаты исследований последних лет, направленных на повышение энергии и пиковой мощности гибридной фемтосекундной лазерной системы видимого диапазона THL-100 на основе фотодиссоционного XeF(C-A)-усилителя и фемтосекундного Ti:Sa-комплекса. Анализируются два варианта работы лазерной системы, основанные на усилении в XeF(C-A)-усилителе положительно либо отрицательно chirпированных импульсов. Показано, что при усилении положительно chirпированного импульса достигается максимальная энергия излучения, а при усилении отрицательно chirпированного импульса — максимальная мощность.

Ключевые слова: гибридная лазерная система, фотодиссоционный XeF(C-A)-усилитель, Ti:Sa стартовый комплекс, chirпированный импульс, стретчер, компрессор; hybrid laser system, photodissociation XeF(C-A) amplifier, Ti:Sa start complex, chirped pulse, stretcher, compressor.

Введение

В настоящее время сверхмощные лазерные системы с длительностью импульса 20–50 фс создаются главным образом на основе твердотельных титан-сапфировых или параметрических усилителей с использованием технологии CPA (усиление chirпированного импульса) [1]. В этих схемах сначала формируется фемтосекундный импульс, затем он удлиняется до субнаносекундной длительности для снижения мощности излучения ниже порога самофокусировки, усиливается и снова сжимается до исходной длительности в компрессоре на основе дифракционных решеток. Все эти системы работают в инфракрасной (ИК) области спектра (0,8–1 мкм). Переход в видимый диапазон спектра позволяет раздвинуть границы области применений таких систем и в ряде случаев способствует повышению эффективности взаимодействия фемтосекундного излучения с веществом [2, 3]. Известен метод получения сверхмощных импульсов излучения в видимой области спектра за счет генерации второй гармоники (ВГ) в процессе преобразования ИК-излучения. Однако его возможности ограничены технологическими трудностями изготовления тонких (< 1 мм толщиной) нелинейных кристаллов достаточно большого диаметра (≥ 20 см). Кроме того, у этого метода есть и другой существенный недостаток: качество преобразованного излучения с фемтосекундной длительностью импульса очень низкое

из-за фазовой самомодуляции, кроссмодуляции, керровской самофокусировки и глубокой модуляции спектра второй гармоники в нелинейном кристалле [4–6]. В связи с этим мощность Ti:Sa-лазера в 4 ТВт, достигнутая в 2005 г. [7] на ВГ (длина волны $\lambda = 400$ нм, длительность импульса $\tau = 60$ фс), долгое время оставалась рекордной для этого метода. Только лишь в 2017 г. на мощной лазерной системе петаваттного уровня на ВГ ($\lambda = 400$ нм) была достигнута пиковая мощность излучения 270 ТВт ($\tau = 30$ фс) [8]. В 2018 г. сообщалось о получении мощности в 27 ТВт ($\tau = 60$ фс, $\lambda = 400$ нм), но отмечалось, что качество излучения ВГ было очень низким [9].

В последнее десятилетие в ИСЭ СО РАН совместно с ФИАН развивается альтернативный путь создания мультитераваттных лазерных систем — на основе твердотельного фемтосекундного лазерного комплекса и фотодиссоционного XeF(C-A)-усилителя с газовой активной средой [10–16]. Достоинствами такой гибридной схемы являются низкая оптическая нелинейность активной газовой среды, видимый диапазон излучения, возможность масштабирования газовой усилителя, достижение высокого контраста за счет преобразования излучения в нелинейном кристалле и низкого коэффициента усиления в газовой среде. Лазерная система может работать по двум оптическим схемам. В 2012 г. в лазерной системе THL-100 была получена рекордная для видимой области спектра мощность 14 ТВт [12], а в 2019 г. мощность была повышена до 40 ТВт [13].

Одной из перспективных областей применения этой лазерной системы может быть создание мощных источников ТГц-излучения методами нелинейной

* Сергей Владимирович Алексеев (darok@sibmail.com); Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru); Аркадий Григорьевич Ястремский (yastrems@ogl.hcei.tsc.ru).

кристаллооптики. При этом в качестве нелинейных сред могут быть использованы оксидные нелинейные кристаллы, обладающие высокой лучевой стойкостью, а для накачки — мощный лазерный пучок видимого диапазона спектра. Энергия и длительность импульса в пучке должны варьироваться в широких диапазонах.

В настоящей работе приводятся результаты исследований условий формирования мощного лазерного пучка за последние годы, анализируются преимущества и недостатки работы лазерной системы THL-100 в условиях усиления в XeF(C-A)-усилителе положительно и отрицательно chirпированного импульса излучения.

1. Аппаратура и методика эксперимента

Лазерная система THL-100 состоит из фемтосекундного стартового Ti:Sa-комплекса «Старт-480М», генератора второй гармоники, призмного стретчера, фотодиссоционного XeF(C-A)-усилителя

и компрессора на основе пластин из плавленного кварца. Стартовый комплекс включает задающий генератор фемтосекундных импульсов, решеточный стретчер, регенеративный и два многопроходных усилителя, компрессор на основе дифракционных решеток. Комплекс работает с частотой следования импульсов 10 Гц или в режиме одиночного импульса с внешним запуском и обеспечивает на выходе спектрально-ограниченный импульс излучения на центральной длине волны $\lambda = 950$ нм с энергией до 50 мДж и $\tau = 60$ –70 фс. В качестве генератора ВГ используется кристалл КДП первого типа толщиной 1,8–2 мм. Энергия ВГ может достигать 20 мДж при $\tau = 50$ фс.

Лазерная система может работать по двум оптическим схемам (рис. 1 и 2).

В первой схеме (рис. 1) в XeF(C-A)-усилитель инжектируется отрицательно chirпированный импульс ВГ, который формируется в призмном стретчере, образованном двумя призмами из плавленного кварца и поворотными зеркалами. Он обеспечивает удлинение импульса излучения второй гармоники с фемтосекундной до пикосекундной (2 пс)

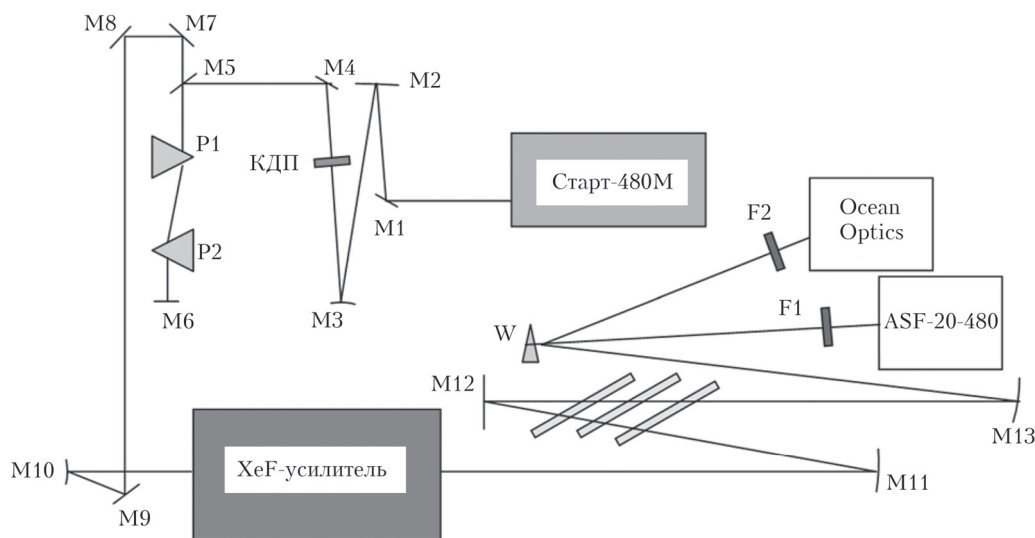


Рис. 1. Первая оптическая схема лазерной системы: M1–M9, M12 — поворотные зеркала; P1 и P2 — призмы стретчера; M10 — выпуклое зеркало с радиусом кривизны $R = -23$ м; M11 — вогнутое зеркало с $R = 15$ м; M13 — вогнутое зеркало с $R = 24,4$ м; W — клин; F1 и F2 — ослабители

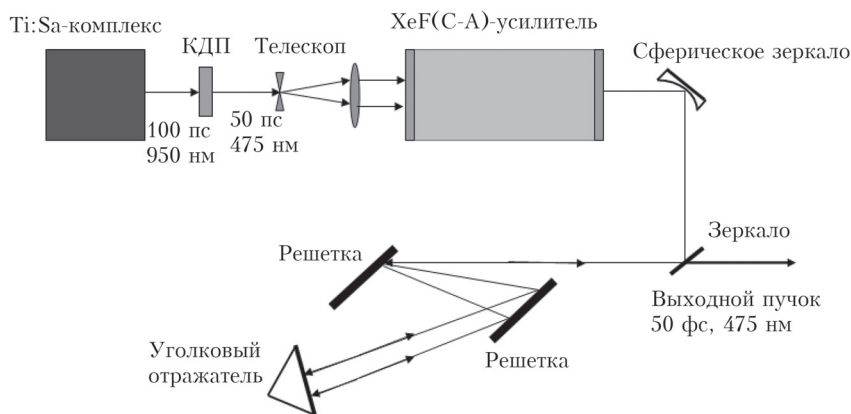


Рис. 2. Вторая оптическая схема лазерной системы

длительности за счет отрицательной дисперсии групповых скоростей. Во второй схеме (рис. 2) в газовый усилитель инжектируется положительно chirпированный импульс ВГ, полученный на выходе КДП при его накачке 100 пс импульсом основной гармоники. В этом случае не используется выходной компрессор стартового комплекса.

В XeF(C-A)-усилителе импульсы излучения усиливаются на 33 проходах по активной среде. Для снижения дифракции усиливаемого излучения на краях зеркал на входе в усилитель устанавливается зубчатая диафрагма с внутренним диаметром 13 мм и отношением высоты зуба к шагу $h/d = 7$. Усилитель подробно описан в наших работах [15, 16]. Его возбуждение обеспечивается вакуумным УФ-излучением электронно-пучкового конвертера, преобразующего энергию шести электронных пучков в УФ-излучение ксенона на $\lambda = 172$ нм. Это излучение заходит в шестигранную лазерную кювету с апертурой 24 см через окна из CaF₂. Кювета наполняется парами XeF₂ с парциальным давлением 0,25 торр и азотом до давления 0,25–0,5 атм. УФ-излучение приводит к фотодиссоциации паров XeF₂ с образованием возбужденного состояния С молекулы ХеF. Вынужденное излучение происходит при переходе молекулы ХеF из состояния С в разлетное состояние А. Для геометрического согласования диаметра пучка с многопроходной зеркальной схемой усилителя перед его входом устанавливается выпуклое зеркало либо зеркальный телескоп. На последних двух проходах излучение дополнительно расширяется предпоследним зеркалом радиусом $R = -5$ м и выводится из кюветы с диаметром 12 см. В первой схеме усиленный пучок коллимируется сферическим зеркалом М11 до диаметра 20 см и проходит компрессор, состоящий из трех пластин (марка КУ) толщиной 4 см, расположенных под углом Брюстера. Потери энергии излучения в компрессоре не превышают 2%. Для второй схемы мы еще только разрабатываем компрессор. К сожалению, компрессоры для мощных импульсов излучения существуют только для ИК-диапазона.

Для измерения длительности импульса усиленного излучения его центральная часть фокусировалась с помощью сферического зеркала М13 (диаметр 90 мм, фокусное расстояние $F = 12,2$ м) и направлялась на автокоррелятор ASF-20-480, предварительно отражаясь от грани клина W из плавленого кварца. Перед автокоррелятором в фокальной перетяжке устанавливалась диафрагма диаметром 250 мкм. Отражение от второй грани клина использовалось для регистрации спектрального состава излучения с помощью спектрометра Ocean Optics (HR4000CG-UV-NIR). В режиме усиления перед спектрометром размещались нейтральные светофильтры F1 и F2.

При измерении энергии усиленного излучения выходной пучок ХеF(C-A)-усилителя сжимался с помощью линзы до диаметра 4 см и направлялся на клин из плавленого кварца. Отраженный от одной грани клина пучок регистрировался измерителем энергии Gentec.

Реальная энергия пересчитывалась с учетом коэффициентов отражения грани клина (3,4%) и поверхностей линзы (7%). За клином располагалась фотобумага для регистрации пространственного распределения интенсивности лазерного пучка. Для расчета энергетических параметров активной среды ХеF(C-A)-усилителя, приводящих к усилению в ней спонтанного шума и инжектируемых импульсов излучения, была разработана и использована компьютерная модель [15].

2. Результаты и обсуждение

Как уже было отмечено, мы исследовали работу лазерной системы по двум оптическим схемам. Возможность использования первой схемы была продиктована сравнительно низким уровнем оптической нелинейности в используемом газовом усилителе, позволяющим усиливать пикосекундные импульсы, и наличием всех оптических элементов для проведения экспериментов (призменная пара, выходной компрессор). Эта схема была реализована в экспериментах по получению пиковой мощности 14 ТВт и 40 ТВт в фемтосекундной системе THL-100 [12, 13]. Однако при работе в такой схеме был выявлен целый ряд узких мест, которые ограничивали мощность лазерной системы. Все они были обусловлены нелинейными процессами (керровская самофокусировка) при распространении фемтосекундного и пикосекундного импульсов через оптические материалы и активную среду газового усилителя. Такие нежелательные явления могли развиваться в генераторе ВГ, призменной паре, в активной среде и компрессоре на основе пластин из плавленого кварца. Мы исследовали пороговые интенсивности на всех оптических элементах и определили оптимальные значения интенсивностей на них, при которых нелинейными эффектами можно пренебречь. На основе этих данных был сделан вывод о том, что, несмотря на возможность получения максимальной энергии в импульсе 2,5 Дж без обратной компрессии импульса до фемтосекундной длительности [16], желательно использовать первую схему при выходной энергии на уровне 1 Дж. Для этого энергия, инжектируемая в газовый усилитель, может находиться на уровне 0,1 мДж, что достаточно легко реализовать, а давление азота в лазерной кювете можно снизить до 0,2–0,25 атм, что сэкономит расход газа и повысит порог нелинейных процессов.

Дальнейшее повышение энергии и мощности в первой схеме возможно лишь за счет применения chirпованных (брэгговских) зеркал как на ранней стадии внесения отрицательного chirпа в инжектируемый импульс, так и в комбинации с обратной временной компрессией в объеме стекла для снижения эффектов самовоздействия лазерного пучка.

Более перспективной для повышения мощности лазерного пучка выглядит вторая схема, которая основана на традиционном усилении положительно chirпированного импульса субнаносекундной длительности с последующим его сжатием в компрессоре

на основе дифракционных решеток. В такой схеме резко снижается оптическая нагрузка на все элементы лазерной системы, кроме выходного компрессора, и упрощается оптическая схема за счет исключения призмного стретчера. Нами были проведены исследования этой схемы в части формирования линейно chirпированного импульса на ВГ Ti:Sa стартового комплекса ($\lambda = 470$ нм) и его усиления в XeF(C-A)-усилителе. Генерация ВГ в КДП при накачке положительно chirпированным импульсом длительностью 100 пс показала, что эффективность преобразования, по сравнению с фемтосекундным импульсом, резко падает, а длительность chirпированного импульса ВГ уменьшается в два раза. Однако в отличие от первой схемы полностью сохраняется ее гауссов профиль и существует возможность получать энергию ВГ на уровне мДж. При усилении этого импульса в XeF(C-A)-усилителе была получена энергия 3,2 Дж, что близко к пределу этой схемы согласно нашим расчетам (рис. 3). Оптимальный угол инжекции лазерного пучка в газовый усилитель позволяет достичь насыщения коэффициента усиления по всей апертуре и получить достаточно однородный пучок на выходе (рис. 4).

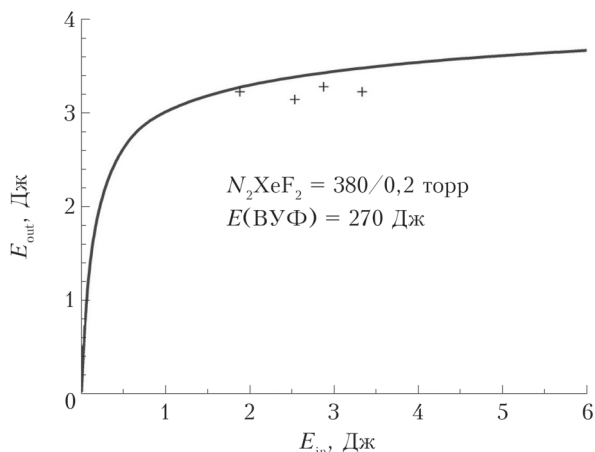


Рис. 3. Зависимость выходной энергии XeF(C-A)-усилителя от входной: кривая — расчет, крестики — эксперимент; погрешность измерения $\pm 10\%$

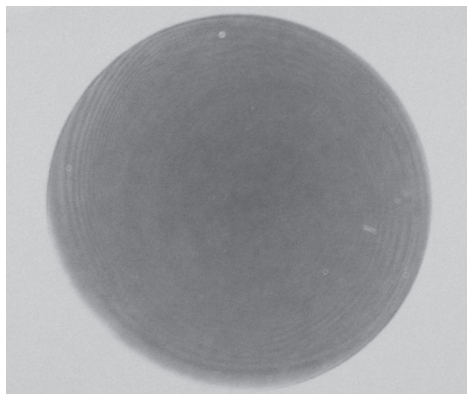


Рис. 4. Отпечаток лазерного пучка на фотобумаге с энергией 3,2 Дж

Заключение

Проанализирована работа мультитераваттной лазерной системы видимого диапазона THL-100, которая до настоящего времени не имеет мировых аналогов, в двух оптических схемах. Показано, что на данный момент наибольшая мощность лазерного пучка реализуется при усилении отрицательно chirпированного импульса излучения в первой оптической схеме. Наибольшая энергия достигается при усилении положительно chirпированного импульса излучения во второй схеме. Более высокая энергия излучения второй схемы обусловлена лучшей однородностью пучка, который инжектируется в газовый усилитель. После разработки выходного компрессора можно будет ожидать дальнейшее повышение выходной мощности лазерной системы THL-100.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-19-00241).

1. Strickland D., Mourou G.A. Compression of amplified chirped optical pulses // Opt. Commun. 1985. V. 56. P. 219–221.
2. Mikheev L.D., Tcheremiskine V.I., Uteza O.P., Sentis M.L. Photochemical gas lasers and hybrid (solid/gas) blue-green femtosecond systems // Prog. Quantum. Electron. 2012. V. 36. P. 98–142.
3. Mikheev L.D., Losev V.F. Multiterawatt Hybrid (Solid/gas) femtosecond systems in the visible // High Energy and Short Pulse Lasers. Croatia: InTech. 2016. Ch. 6. P. 131–161.
4. Begishev I.A., Kalashnikov M., Karpov V., Nickles P., Schönnagel H., Kulagin I.A., Usmanov T. Limitation of second-harmonic generation of femtosecond Ti:sapphire laser pulses // Opt. Soc. Am. 2004. V. 21. P. 318–322.
5. Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Миронов С.Ю., Потемкин А.К., Хазанов Е.А. Влияние мелкомасштабной самофокусировки на генерацию второй гармоники сверхсильным лазерным полем // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 6. С. 503–508.
6. Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Курсанов А.В., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 11. С. 963–967.
7. Toth R., Kieffer J.C., Fourmaux S., Ozaki T. In-line phase-contrast imaging with a laser-based hard x-ray source // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. P. 083701.
8. Wang Y., Wang Sh., Rockwood A., Luther B.M., Hollinger R., Curtis A., Calvi Ch., Menoni C.S., Rocca J.J. 0.85 PW laser operation at 3.3 Hz and high-contrast // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 3828–3831.
9. Curtis A., Calvi C., Tinsley J., Hollinger R., Kaymak V., Pukhov A., Wang Sh., Rockwood A., Wang Y., Shlyaptsev V.N., Rocca J.J. Micro-scale fusion in dense relativistic nanowire array plasmas // Nature Commun. 2018. V. 9. P. 1077.
10. Mikheev L.D. Possibility of amplification of a femtosecond pulse up to 1 kJ energy // Laser Part. Beams. 1992. V. 10. P. 473–478.
11. Аристов А.И., Грудцын Я.В., Зубарев И.Г., Иванов Н.Г., Крохин О.Н., Лосев В.Ф., Мамаев С.Б., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Растворцева А.А., Ратахин Н.А., Сентис М.Л., Стародуб А.Н., Утеза О., Черемискин В.И., Яловой В.И.

Гибридная фемтосекундная лазерная система с выходным усилителем на эксимерных молекулах XeF(C-A) с апертурой 12×12 см // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 11. С. 1029–1034.

12. Алексеев С.В., Аристов А.И., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратахин Н.А. Мультитераваттная фемтосекундная система гибридного типа на основе фотодиссоционного XeF(C-A)-усилителя видимого диапазона // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 5. С. 377–378.
13. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Ратахин Н.А., Панченко Ю.Н. Достижение пиковой мощности 40 ТВт в гибридной фемтосекундной системе видимого диапазона THL-100 // Квант. электрон. 2019. Т. 49, № 10. С. 947–950.
14. Alekseev S.V., Aristov A.I., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D.,

Panchenko Yu.N., Ratakhin N.A. Multiterawatt femtosecond laser system in the visible with photochemically driven XeF(C-A) boosting amplifier // Laser Part. Beams. 2013. V. 31, N 1. P. 17–21.

15. Алексеев С.В., Аристов А.И., Грудцын В.Я., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Мамаев С.Б., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Поливин А.В., Степанов С.Г., Ратахин Н.А., Яловой В.И., Ястремский А.Г. Гибридные фемтосекундные системы видимого диапазона на основе XeF(C-A)-усилителя: состояние и перспективы // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 3. С. 190–200.
16. Losev V.F., Alekseev S.V., Ivanov M.V., Ivanov N.G., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Panchenko Yu.N., Ratakhin N.A., Yastremsky A.G. Hybrid THL-100 laser system: results and prospect // Proc. SPIE. 2019. V. 11042. P. 110420P.

S.V. Alekseev, V.F. Losev, A.G. Yastremskii. Study of the powerful visible range THL-100 laser system.

The results of recent studies aimed at increasing the energy and peak power of THL-100 hybrid femtosecond laser system in visible range based on photodissociation XeF(C-A) amplifier and Ti:Sa femtosecond complex are presented. Two versions of the laser system operation based on the amplification of positively or negatively chirped pulses in the XeF(C-A) amplifier are analyzed. It is shown that when the positive-chirped pulse is amplified, the radiation energy maximum is achieved, and when the negative-chirped pulse is amplified, the power maximum is achieved.