

УДК 621.373

## Тераваттная гибридная лазерная система ТНЛ-100 на базе фотодиссоционного ХеF(C–A)-усилителя

С.В. Алексеев<sup>1</sup>, Н.Г. Иванов<sup>1</sup>, Б.М. Ковальчук<sup>1</sup>, В.Ф. Лосев<sup>1</sup>, Г.А. Месяц<sup>2</sup>, Л.Д. Михеев<sup>2</sup>, Ю.Н. Панченко<sup>1</sup>, Н.А. Ратахин<sup>1</sup>, А.Г. Ястремский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
119991, г. Москва, Ленинский пр., 53

Поступила в редакцию 10.10.2011 г.

Описана созданная в Институте сильноточной электроники СО РАН мультитераваттная гибридная лазерная система (ТНЛ-100) на основе Ti:Sa стартового комплекса «Старт-480М» и фотодиссоционного ХеF(C–A)-усилителя с апертурой 25 см. Комплекс обеспечивает 50-фс импульс излучения с энергией на второй гармонике (475 нм) до 5 мДж. Активная среда усилителя создается в смеси ХеF<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> при воздействии ВУФ-излучения ксенона, возбуждаемого электронным пучком. Сообщается о разработке когерентной программы расчета параметров ХеF(C–A)-усилителя. Приводятся первые расчетные и экспериментальные результаты, полученные на данной лазерной системе, по усилению фемтосекундного импульса излучения различной длительности в активной среде ХеF(C–A)-усилителя. В первых экспериментах достигнута энергия 1 Дж при длительности импульса 1 пс.

Ключевые слова: гибридная лазерная система, фемтосекундный импульс, активная среда, вторая гармоника, фотодиссоционный усилитель, лазерный пучок; hybrid laser system, femtosecond pulse, active medium, second harmonic, photochemical amplifier, laser beam.

### Введение

В настоящее время создание сверхмощных лазерных систем с длительностью импульса 30–100 фс основано главным образом на применении твердотельных титан-сапфировых или параметрических усилителей и техники усиления положительно chirпированных импульсов, т.е. растянутых во времени импульсов (0,5–1 нс) методом линейной частотной модуляции. После усиления импульсы снова сжимают до исходной длительности. Удлинение импульса необходимо для снижения его мощности ниже порога нелинейного самовоздействия и обычно составляет в твердотельных системах величину порядка  $10^4$ – $10^5$  раз. Растяжение и сжатие импульсов осуществляются с помощью решеток с золотым покрытием. Одна из наиболее существенных трудностей, возникающих при масштабировании таких систем до мультитераваттного уровня мощности, связана с ограничениями на размеры дифракционных решеток для компрессии импульса на выходе оконечного каскада (при характерной для них лучевой

прочности 0,2 Дж/см<sup>2</sup> размер решетки в петаваттной системе достигает 0,7–1 м).

В последние годы в трех научных группах (ИСЭ СО РАН, Томск; ФИАН, Москва, и Марсельский университет, Франция) активно разрабатывается альтернативный путь для создания мультитераваттных и петаваттных фемтосекундных лазерных систем [1–9]. Он основан на использовании твердотельного фемтосекундного лазерного комплекса (2-я гармоника) и усилителя с газовой активной средой (молекулы ХеF(C–A)). Достоинством такой гибридной (твердотельная и газовая среды) схемы построения фемтосекундных систем является то обстоятельство, что, благодаря гораздо более низкой оптической нелинейности газовых активных сред по сравнению с твердым телом, допустимый коэффициент временного растяжения фемтосекундных импульсов перед их усилением более чем на 3 порядка меньше, чем в твердотельных системах. Это позволяет усилить chirпированные импульсы субпикосекундного диапазона длительностей и затем сжимать их в обычном стекле за счет явления положительной дисперсии групповых скоростей. Благодаря этому появляется возможность исключить использование дорогостоящих вакуумных компрессоров на основе дифракционных решеток, применяемых в твердотельных системах.

Нелинейное преобразование излучения для спектрального согласования твердотельной системы

\* Сергей Владимирович Алексеев; Николай Георгиевич Иванов; Борис Михайлович Ковальчук; Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru); Геннадий Андреевич Месяц; Леонид Дмитриевич Михеев; Юрий Николаевич Панченко (uranchenko@sibmail.com); Николай Александрович Ратахин; Аркадий Григорьевич Ястремский.

с газовой активной средой и низкий коэффициент усиления газовой среды способствуют существенно повышению контраста, что является важным преимуществом гибридной системы. Наконец, газовые активные среды не имеют физических ограничений на их масштабирование.

В настоящей статье рассматривается мультитераваттная гибридная лазерная система THL-100 с апертурой 25 см и приводятся первые экспериментальные результаты по усилению фемтосекундного импульса.

## Методики и аппаратура

### *Задающий генератор фемтосекундных импульсов*

В качестве задающего генератора для лазерной системы используется стартовый комплекс «Старт-480М», изготовленный фирмой «Авеста-Проект» (рис. 1).



Рис. 1. Фемтосекундный комплекс

Комплекс размещается на оптическом столе и состоит из Ti:сапфирового задающего генератора фемтосекундных импульсов с непрерывным лазером накачки (Verdy-8) на длине волны 532 нм, стретчера для растягивания импульса, регенеративного и многопроходного усилителей с импульсным лазером накачки на длине волны 532 нм, решетчатого компрессора и генератора второй гармоники. Комплекс имеет следующие параметры лазерного пучка: длительность импульса спектрально ограниченного пучка 50 фс, энергия излучения на второй гармонике (475 нм) до 5 мДж. Комплекс может работать с частотой 10 Гц и в режиме одиночного импульса с внешним запуском.

### *Фотодиссоционный XeF(C–A)-усилитель*

На рис. 2 представлен внешний вид XeF(C–A)-усилителя, который состоит из двух высоковольтных генераторов, вакуумного диода, газовой камеры с ксеноном, лазерной кюветы с зеркальной системой для многопроходного усиления пучка.



Рис. 2. Внешний вид XeF(C–A)-усилителя

Активная среда XeF(C–A)-усилителя создается в шестигранной по сечению лазерной кювете с апертурой 25 см при воздействии на смесь газов  $N_2$ – $XeF_2$  потоком ультрафиолетового излучения на длине волны 172 нм. Каждая грань кюветы вакуумноплотно закрывается окнами (пластины из  $CaF_2$ ), через которые ВУФ-излучение осуществляет накачку лазерной смеси. Окна имеют размер  $12 \times 12$  см и на одной грани их 9. Вокруг лазерной кюветы в камере диаметром 45 см находится ксенон, который возбуждается шестью ленточными электронными пучками (напротив окон), инжектируемыми через 40-мкм Ti-фольгу. Каждый электронный пучок имеет размер  $100 \times 15$  см и длительность импульса 150 нс на полувысоте амплитуды. Общая энергия электронных пучков за фольгой 6–7 кДж. Максимальная энергия электронов в диоде составляет 550 кэВ. Пучок практически полностью поглощается ксеноном при давлении 3 атм на длине его пробега (8 см). Энергия ВУФ-излучения ксенона, прошедшего в лазерную кювету через окна, составляет 240–260 Дж.

Под действием ВУФ-излучения в лазерной кювете происходит фотодиссоциация молекул  $XeF_2$  с образованием эксимерных молекул  $XeF(B)$ . Состояние (C) лазерного перехода  $XeF(C–A)$  образуется в результате релаксации молекулы  $XeF(B)$  при столкновении с молекулами буферного газа  $N_2$ .

Для получения максимальной эффективности преобразования энергии электронного пучка в ВУФ-излучение ксенона в газовой камере обеспечивались высокая чистота ксенона (99,9997%) и предварительная высоковакуумная откачка. После срабатывания электронного ускорителя чистота ксенона постепенно ухудшалась. Для восстановления прежней чистоты газа отработанный ксенон несколько раз пропускался через систему очистки «Sircal MP-2000». Число циклов очистки ксенона зависело от количества импульсов накачки ксенона и времени его нахождения в газовой камере.

Для измерения энергии электронного пучка за фольгой и ВУФ-излучения в лазерной камере использовался калориметр ТПИ-2-7. Измерение коэффициента усиления для малого сигнала проводилось

на 4 проходах по активной среде с помощью непрерывного полупроводникового лазера SAPPHIRE-488, который излучает на длине волны 488 нм. Распределение коэффициента усиления измерялось по всему сечению лазерной камеры. Усиление фемтосекундного лазерного пучка проводилось в многопроходной оптической схеме (33 прохода), состоящей из 32 круглых зеркал разного диаметра. Перед входом в XeF(C-A)-усилитель пучку задавался определенный угол расхождения с помощью зеркального телескопа, поэтому по мере усиления он увеличивался в диаметре с 2 (на входе) до 6 см (предпоследнее зеркало) и совершал два круговых обхода вблизи окон лазерной камеры. Предпоследнее зеркало (выпуклое) направляло пучок на плоское зеркало диаметром 10 см, расположенное на оптической оси. После отражения от этого зеркала пучок распространялся симметрично по оптической оси и выводился наружу диаметром 12 см.

В экспериментах фемтосекундный импульс длительностью 50 фс либо сразу заводился в усилитель, либо предварительно удлинялся (за счет чирпирования в стекле) до 0,5–1 пс. Измерение выходной энергии пучка производилось с помощью двух положительных линз, которые фокусировали его на клин из плавленного кварца до диаметра 2,5 см. Отраженный от грани клина пучок регистрировался измерителем энергии OPHIR. Реальная энергия усиленного пучка пересчитывалась с учетом откалиброванных потерь в схеме регистрации. Синхронизация комплекса и усилителя осуществлялась с помощью блока запуска комплекса, точность синхронизации составляла  $\pm 10$  нс.

Все измерения проводились в первом выстреле, так как уже во втором параметры активной среды усилителя снижались, например усиленная энергия уменьшалась на 20–30%. Длительность чирпированного импульса за счет прохождения в стекле рассчитывалась стандартной методикой.

### Модель для расчетов

Для расчетов параметров активной среды XeF(C-A)-усилителя и усиления фемтосекундных импульсов была создана когерентная модель. Модель включает уравнение, описывающее пространственно-временные изменения плотности потока излучения накачки, скоростные уравнения, описывающие пространственно-временные изменения концентрации частиц XeF(C), XeF(C<sub>0</sub>), XeF(B), XeF(B<sub>0</sub>), уравнение, описывающее изменение напряженности электрического поля импульса излучения, и уравнения для поляризации активной среды. Модель учитывает все известные на сегодняшний день процессы и позволяет проводить численное исследование усиления импульсов длительностью до  $10^{-14}$ – $10^{-13}$  с, которые находят широкое применение в физических исследованиях.

В когерентной модели лазерный импульс представляется в виде импульса электрического поля, изменение амплитуды которого во времени описывается функцией Гаусса. Каждая молекула XeF(C<sub>0</sub>)

представляется в виде диполя. Суммарный дипольный момент единицы объема определяет поляризацию среды, которая возрастает по мере увеличения напряженности поля в среде.

### Результаты экспериментов и расчетов

Проведенные расчеты и измерения коэффициента усиления с помощью непрерывного лазера показали, что он существенно зависит от концентрации паров XeF<sub>2</sub> и расстояния от окон лазерной камеры, через которые производится инжекция ВУФ-излучения. В области окон величина коэффициента в максимуме составляет  $0,004$  см<sup>-1</sup>. Длительность импульса усиленного сигнала на полувысоте амплитуды составляла около 200 нс, и это время, в принципе, может быть использовано для эффективного усиления фемтосекундного импульса. Однако наши эксперименты по усилению фемтосекундного импульса проводились только на временном масштабе 146 нс, когда коэффициент усиления в активной среде был максимальным.

Для определения оптимальных условий усиления фемтосекундного импульса были проведены эксперименты и расчеты распределения коэффициента усиления слабого сигнала по сечению активной среды для различного давления паров XeF<sub>2</sub> (рис. 3).

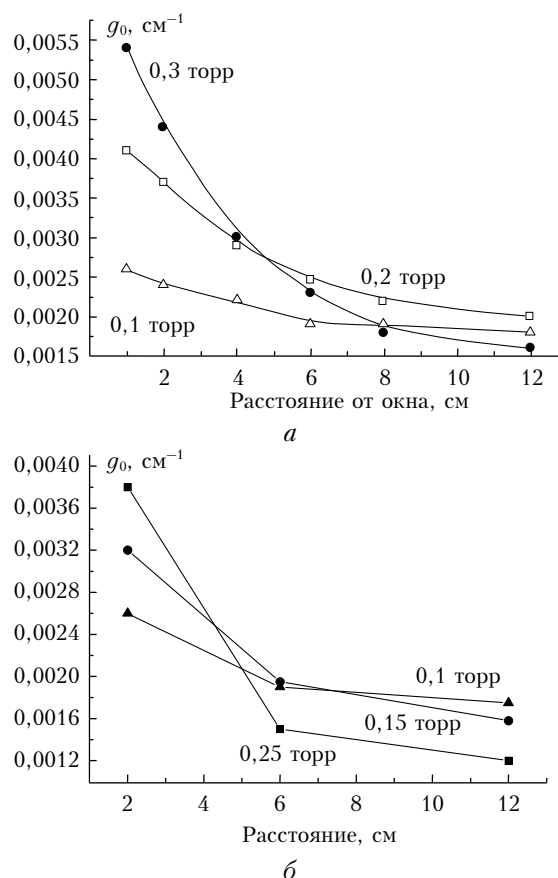


Рис. 3. Распределение коэффициента усиления слабого сигнала от окна к центру лазерной кюветы для различного давления паров XeF<sub>2</sub>. Давление азота 0,25 атм: а – расчет; б – эксперимент

Видно, что с уменьшением давления паров улучшается однородность распределения, однако при этом существенно уменьшается величина усиления в области окон. Окончательная оптимизация смеси была проведена при усилении фемтосекундного импульса в реальной оптической схеме. Лучшие результаты по энергии выходного излучения были получены для давления паров 0,2–0,25 торр. Эксперименты проводились для различных уровней энергии импульса излучения, входящего в усилитель, — от 40 мкДж до 2 мДж. В режиме ненасыщенного усиления энергия выходного излучения из усилителя повышалась более чем в 5000 раз. В режиме, близком к насыщению ( $30\text{--}50\text{ мДж/см}^2$ ), энергия выходного излучения повышалась в 400–500 раз. Отметим, что инжектируемый в усилитель лазерный пучок, имеющий энергию в единицы миллиджоулей, был неоднородным и эта неоднородность возрастала с ростом энергии пучка, выходящего из стартового комплекса. Неоднородность пучка, возникающая в основном в нелинейном кристалле (КДП) и призмном стретчере, безусловно, снижала эффективность сьема энергии с XeF(C–A)-усилителя при его усилении.

Из литературы известно, что при усилении фемтосекундного импульса в активной среде XeF(C–A)-усилителя необходимо учитывать время переориентации диполей молекул XeF(C), которое составляет по расчетам 800 фс [10]. Экспериментальные и расчетные данные по усилению фемтосекундных импульсов различной длительности в фотодиссоционном XeF(C–A)-усилителе отсутствуют. Нами впервые было изучено влияние длительности импульса на выходную энергию XeF(C–A)-усилителя. Эксперименты проводились при энергии входного пучка 1–2 мДж, когда усилитель работает в режиме, близком к насыщению. Экспериментальные и расчетные зависимости выходной энергии излучения от длительности входного импульса приведены на рис. 4.

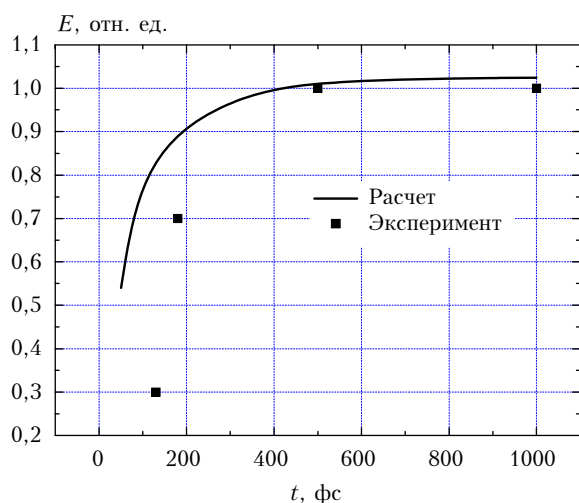


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные зависимости выходной энергии излучения от длительности входного импульса. Энергия входного импульса  $E = 2$  мДж, усиление на 33 проходах по активной области, давление азота 190 торр, давление XeF<sub>2</sub> 0,25 торр

Видно, что увеличение длительности инжектируемого импульса с 50 до 500 фс и более приводит к росту выходной энергии в 3–4 раза. Отметим, что при инъекции в усилитель 50-фс импульса после входного окна его длительность становилась  $\sim 130$  фс. Выходная энергия усиленного импульса с длительностью 500 и 1000 фс практически не отличалась. Максимальная выходная энергия 1 Дж была получена при усилении импульса длительностью  $\sim 1000$  фс.

## Заключение

Итак, первые экспериментальные исследования по усилению фемтосекундного chirpированного импульса различной длительности в активной среде XeF(C–A)-усилителя показали, что увеличение длительности импульса со 130 до 1000 фс приводит к увеличению выходной энергии в фотодиссоционном XeF(C–A)-усилителе в 3–4 раза. При усилении импульса с энергией 2 мДж и длительностью  $\sim 1$  пс достигнута рекордная для таких систем выходная энергия 1 Дж, что при длительности 50 фс соответствует мощности 20 ТВт. В дальнейшем на лазерной системе планируются повышение выходной энергии фемтосекундного комплекса, оптимизация длительности усиливаемого импульса, в том числе с отрицательным chirпом, и получение выходного пучка с максимальной мощностью.

1. Losev V., Ivanov N., Mikheev L., Bojchenko A., Tkachev A., Yakovlenko S. Project of a 100-terawatt XeF(C–A) femtosecond pulse amplifier pumped by the VUV radiation from an  $e$ -beam driven converter // Proc. Second Int. Conf. on Ultrahigh Intensity Lasers, Development, Science and Emerging Applications (ICUIL 2006). September 25–29, Cassis, France, 2006. P. 197–199.
2. Ionin A.A., Konyashchenko A.V., Koval'chuk B.M., Krokhin O.N., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Molchanov A.G., Novoselov Yu.N., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Starodub A.N., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I., Zvorykin V.D. High Power Optical Sources of Femtosecond Pulses on the Base of Hybrid Laser System with Wide-Aperture Gas Laser Amplifiers // Proc. SPIE. 2007. V. 6454. P. 645409 (1–11).
3. Зворыкин В.Д., Ионин А.А., Колященко А.В., Ковальчук Б.М., Крохин О.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Молчанов А.Г., Новоселов Ю.Н., Селезнев Л.В., Синицын Д.В., Стародуб А.Н., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Мощные фемтосекундные гибридные лазерные системы с широкоапертурными усилителями на основе газовых лазеров. 2. Гибридная фемтосекундная XeF(C–A)-лазерная система // Изв. ТПУ. 2008. № 2. С. 123–127.
4. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Михеев Л.Д. Фемтосекундный усилитель на основе эксимерных молекул XeF(C–A) // Тезисы докл. III Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». Новосибирск, 16–20 марта 2009. С. 77–78.
5. Аристов А.И., Грудицын 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.
6. Losev V., Alekseev S., Ivanov N., Kovalchuk B., Mikheev L., Mesyats G., Panchenko Yu., Ratakhin N., Yastremsky A. Development of a hybrid (solid state/gas) femtosecond laser system of multiterawatt peak power // Proc. SPIE. 2010. V. 7751. P. 775109.
  7. Aristov A., Grudtsin Y., Zubarev I., Ivanov N., Krokhin O., Losev V., Mamaev S., Mesyats G., Mikheev L., Panchenko Yu., Ratakhin N., Sentis M., Starodub A., Uteza O., Tcheremiskine V., Yalovoy V. Recent Progress on Hybrid (Solid/Gas) Blue-Green fs Laser System. ICUIL2010, 26 sep. – 1 oct. 2010, Rochester, N.Y., USA.
  8. Alexeev S.V., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Panchenko Yu.N., Puchkin A.V., Ratakhin N.A., Yastremsky A.G. Research of femtosecond laser pulse amplification in photochemically driven XeF(C–A) active medium // Proc. 16-th Int. Sympos. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. September 19–24 2010. P. 593–595.
  9. Tcheremiskine V., Coustillier G., Uteza O., Clady R., Charmasson L., Aristov A., Moskalev T., Ginsburg V., Losev V., Sentis M., Mikheev L. Development of a blue-green hybrid (solid/gas) multi-TW laser system // Conf. program of Int. Conf. on Lasers, Applications and Technol. (LAT 2010). Kazan, Russia. 23–26 August 2010. P. 56.
  10. Sharp T.E., Hofmann Th., Dane C.B., Wilson W.I., Tittel F.K., Wisoff P.J., Szabo G. Ultrashort-laser-pulse amplification in a XeF(C–A) excimer amplifier // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 1461–1463.

*S.V. Alekseev, N.G. Ivanov, B.M. Kovalchuk, V.F. Losev, G.A. Mesyats, L.D. Mikheev, Yu.N. Panchenko, N.A. Ratakhin, A.G. Yastremsky. Hybrid femtosecond laser system THL-100 on the base of XeF(C–A) amplifier.*

Development of terawatt hybrid laser (THL-100) system on the base of Ti:sapphire starting complex of “Start-480” and photochemical XeF(C–A) amplifier with an aperture of 25 cm is presented. The complex produces the laser beam with a pulse duration of 50 fs and energy at the second harmonic (475 nm) up to 5 mJ. Active medium of XeF(C–A) amplifier is produced in the mixture of XeF<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> by radiation of Xe excimer molecules pumped by an electron beam. Development of coherent program for simulation of amplifier parameters is presented. The first results of numerical modeling and experiments of amplification of femtosecond pulse of radiation with different pulse durations are shown. In the first experiments 1 J output energy with 1 ps pulse duration was demonstrated.