

# Мультитераваттная фемтосекундная система гибридного типа на основе фотодиссоционного XeF(C–A)-усилителя видимого диапазона

С.В.Алексеев, А.И.Аристов, Н.Г.Иванов, Б.Н.Ковальчук, В.Ф.Лосев, Г.А.Месяц, Л.Д.Михеев, Ю.Н.Панченко, Н.А.Ратахин

*Сообщается о создании мультитераваттной гибридной лазерной системы на основе Ti:сапфирового стартового комплекса и фотодиссоционного XeF(C–A)-усилителя с апертурой 25 см. Стартовый комплекс обеспечивает получение импульсов излучения длительностью 50 фс с энергией во второй гармонике ( $\lambda = 475$  нм) до 5 мДж. Активная среда усилителя создается в смеси XeF<sub>2</sub>–N<sub>2</sub> при воздействии ВУФ излучения ксенона, возбуждаемого мощным электронным пучком. При усилении отрицательно chirпированного импульса длительностью 1 пс с последующей компрессией выходного импульса в объеме кварцевого стекла достигнута рекордная для видимого диапазона мощность излучения 14 ТВт.*

**Ключевые слова:** гибридная фемтосекундная система, фотодиссоционный XeF(C–A)-усилитель, отрицательно chirпированный импульс, компрессия в объеме стекла.

## 1. Введение

В настоящее время получил развитие гибридный (твердотельная и газовая активные среды) подход к созданию фемтосекундных лазерных систем сверхвысокой мощности на основе фотодиссоционного XeF(C–A)-усилителя (см., напр., [1–5]). Достоинством такого подхода является более низкая оптическая нелинейность газовой активной среды по сравнению с твердым телом, видимый диапазон излучения, высокий контраст и возможность масштабирования конечного усилителя. Низкая оптическая нелинейность активной среды позволяет усиливать фемтосекундные импульсы, растянутые при отрицательном chirпе до пикосекундных длительностей, и использовать для компрессии усиленных импульсов нормальную дисперсию в объеме стекла. Это дает возможность избавиться от вакуумного компрессора на основе дифракционных решеток – одного из наиболее сложных и дорогостоящих устройств твердотельных систем.

В настоящей работе сообщается о создании в ИСЭ СО РАН (Томск) мультитераваттной гибридной лазерной системы с выходной апертурой 25 см и приводятся первые результаты экспериментальных исследований параметров активной среды XeF(C–A)-усилителя и усиления в ней фемтосекундного импульса излучения ( $\lambda = 475$  нм).

## 2. Аппаратура и методики измерения

В качестве задающего генератора для лазерной системы используется стартовый комплекс «Старт-480М»

С.В.Алексеев, Н.Г.Иванов, Б.Н.Ковальчук, В.Ф.Лосев, Ю.Н.Панченко, Н.А.Ратахин. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru, darok@sibmail.com  
А.И.Аристов, Г.А.Месяц, Л.Д.Михеев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: mikheev@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 24 апреля 2012 г.

(«Авеста-Проект»). Комплекс обеспечивает энергию излучения во второй гармонике ( $\lambda = 475$  нм) до 5 мДж в импульсе длительностью 50 фс. Активная среда XeF(C–A)-усилителя создается при фотодиссоциации молекул XeF<sub>2</sub> ВУФ излучением на длине волны  $\sim 172$  нм. При этом образуются эксимеры XeF(B), которые релаксируют в С-состояние лазерного перехода (C–A) при столкновении с буферным газом N<sub>2</sub>. Внешний вид XeF(C–A)-усилителя представлен на рис.1. Он включает в себя два высоковольтных импульсных генератора и вакуумный диод, генерирующий шесть сходящихся электронных пучков. Пучки инжектируются в газовую камеру (конвертер), заполненную ксеноном при давлении 3 атм. Возбуждаемое электронами излучение ксенона на длине волны 172 нм через окна из CaF<sub>2</sub> попадает в лазерную кювету (апертура 25 см), погруженную в ксенон. Более подробное описание XeF(C–A)-усилителя можно найти в [4].

Распределения коэффициента усиления малого сигнала по сечению лазерной кюветы измерялось с помощью непрерывного полупроводникового лазера Sapphire-488 на длине волны 488 нм, близкой к максимуму полосы усиления



Рис.1. Внешний вид XeF(C–A)-усилителя.

ния на переходе  $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ . Фемтосекундное излучение усиливалось в тридцатитрехпроходной оптической схеме, состоящей из 32 круглых зеркал постепенно увеличивающегося диаметра, которые располагались по периметру внутренних фланцев лазерной кюветы. Пучок совершал два круговых обхода по внутреннему периметру лазерной кюветы. На последнем проходе излучение усиливалось вдоль оси лазерной кюветы. В усилитель инжектировался расходящийся пучок диаметром 2 см, на выходе его диаметр составлял 12 см. Перед усилением импульс удлинялся до 1 пс в призмном стретчере с отрицательной дисперсией групповых скоростей, а после усиления пучок увеличивался в диаметре до 20 см и сжимался при двукратном прохождении через три кварцевые пластины толщиной 4 см, установленные под углом Брюстера. Длительность импульса измерялась автокоррелятором ASF-20-480, его энергия – измерителем OPHIR.

### 3. Результаты экспериментов

На рис.2 представлено пространственное распределение коэффициента усиления по активной среде при различных давлениях паров  $\text{XeF}_2$ . С уменьшением давления паров улучшается однородность распределения, однако при этом существенно уменьшается величина усиления на периферии лазерной камеры. Окончательная оптимизация смеси проводилась по результатам измерений коэффициента усиления в тридцатитрехпроходной схеме. Наибольшее усиление было получено в смеси с парциальным давлением паров  $\text{XeF}_2$  0.2–0.25 Тор при давлении азота 0.25 атм.

В экспериментах по усилению пикосекундного импульса энергия на входе в  $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ -усилитель изменялась в диапазоне 0.04–2 мДж. При этом в режиме ненасыщенного усиления полный коэффициент усиления достигал  $5 \times 10^3$ , а в режиме, близком к насыщению усилителя ( $50 \text{ мДж/см}^2$ ), он уменьшался до  $5 \times 10^2$ . Максимальная энергия усиленного импульса составляла 1 Дж.

При энергии пучка 0.7 Дж была осуществлена компрессия усиленного импульса. На рис.3 приведена автокорреляционная функция сжатого импульса, соответствующая длительности импульса 50 фс (форма импульса  $\text{sech}^2(x)$ ). Данный результат свидетельствует о достижении

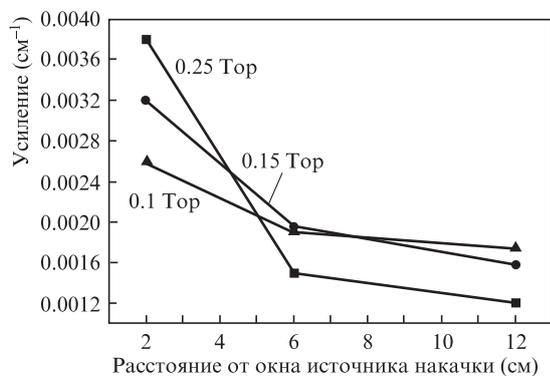


Рис.2. Распределение коэффициента усиления слабого сигнала от источника накачки к оси лазерной кюветы при различных давлениях паров  $\text{XeF}_2$  и давлении азота 0.25 атм.

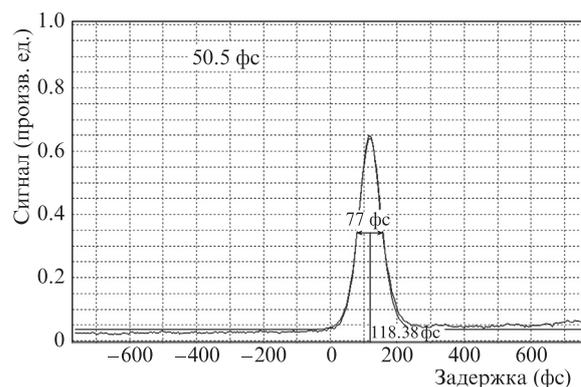


Рис.3. Автокорреляционная функция выходного импульса с энергией 0.7 Дж.

пиковой мощности 14 ТВт. По литературным данным наибольшие мощности фемтосекундного излучения в видимом диапазоне спектра ранее были достигнуты при прямом усилении импульсов длительностью 250 фс в  $\text{XeF}(\text{C}-\text{A})$ -усилителе, возбуждаемом электронным пучком (1 ТВт [6]), и при нелинейном преобразовании излучения  $\text{Ti}:\text{сапфир}$ ового лазера во вторую гармонику (4 ТВт [7]), что значительно уступает полученному в настоящей работе результату.

### 4. Заключение

Таким образом, осуществлен физический запуск гибридной фемтосекундной лазерной системы. В первых экспериментах по усилению фемтосекундных импульсов, растянутых при отрицательном чирпе до длительности 1 пс, достигнута выходная энергия 1 Дж. При выходной энергии 0.7 Дж осуществлена компрессия усиленных импульсов в объеме кварцевого стекла до исходной длительности 50 фс и достигнута рекордная для фемтосекундного излучения видимого диапазона пиковая мощность 14 ТВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00022, 11-08-98050-р\_сибирь\_a) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 02.740.11.0560)

Авторы выражают признательность ЛНС НИЦ «Курчатовский институт» за предоставление дифторида ксенона для проведения экспериментов.

1. Clady R., Coustiller G., Gastaud M., Sentis M., Spiga P., Tcheremiskine V., Uteza O., Mikheev L.D., Mislavskii V., Chambaret J.P., Chriaux G. *Appl. Phys. B*, 82, 347 (2006).
2. Tcheremiskine V., Uteza O., Aristov A., Sentis M., Mikheev L. *Appl. Phys. B*, 91, 447 (2008).
3. 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. и др. *Оптика атмосферы и океана*, 22, 1029 (2009).
4. Алексеев С.В., Иванов Н.Г., Ковальчук Б.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Панченко Ю.Н., Ратахин Н.А., Ястремский А.Г. *Оптика атмосферы и океана*, 25, 221 (2012).
5. Mikheev L.D. *Laser Part. Beams*, 10, 473 (1992).
6. Hofmann T., Sharp T.E., Dane C.B., Wisoff P.J., Wilson W.L., Jr., Tittel F.K., Sabo G. *IEEE J. Quantum Electron.*, 28, 1366 (1992).
7. Ozaki T., Kieffer J.-C., Toth R., Fourmaux S., Bandulet H. *Laser Part. Beams*, 24, 101 (2006).