

УДК 535:621.373.826

МОЩНЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ С ШИРОКОАПЕРТУРНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ. 2. ГИБРИДНАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ХеF(C-A) ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА

В.Д. Зворыкин, А.А. Ионин, А.В. Конященко, Б.М. Ковальчук*, О.Н. Крохин, В.Ф. Лосев*,
Г.А. Месяц, Л.Д. Михеев, А.Г. Молчанов, Ю.Н. Новоселов, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын,
А.Н. Стародуб, В.Ф. Тарасенко*, С.И. Яковленко**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

**Институт общей физики им. А.Н. Прохорова РАН, г. Москва

E-mail: aion@sci.lebedev.ru

Обсуждается одна из двух создаваемых в настоящее время в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН многокаскадных гибридных лазерных систем, генерирующих ультракороткие импульсы излучения с пиковой мощностью $\sim 10^{14} \dots 10^{15}$ Вт. Эта система основана на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны ~ 480 нм (вторая гармоника Ti:Sa-лазера) в среде фотохимического ХеF(C-A)-лазера с накачкой ВУФ излучением электронно-пучковой Хе₂ лампы. Конечным каскадом лазерной системы будет являться электронно-пучковая установка с лазерной камерой диаметром 30...40 см и длиной около 2 м. Параметры накачки такой установки близки к параметрам лазера, ранее разработанного в Институте сильноточной электроники СО РАН: энергия электронов ~ 600 кэВ, удельная мощность накачки $\sim 300 \dots 500$ кВт/см², длительность импульса электронного пучка $\sim 100 \dots 200$ нс. Теоретически показано, что энергия лазерного импульса на выходе конечного усилительного каскада может достигать ~ 75 Дж при длительности импульса 25 фс. Ti:Sa лазерная система, генерирующая ~ 50 фс импульсы с энергией 4 мДж на длине волны 480 нм разработана и установлена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

1. Введение

В первой части статьи [1] обсуждались вопросы, связанные с построением в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН совместно с Институтом сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН гибридной лазерной системы, основанной на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны 248 нм (третья гармоника Ti:Sa-лазера) в активной среде электронно-пучкового КгF лазерного усилителя. В данной части статьи обсуждается гибридная лазерная система, основанная на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны ~ 480 нм (вторая гармоника Ti:Sa-лазера) в среде фотохимического ХеF(C-A)-лазера с накачкой ВУФ излучением электронно-пучковой Хе₂ лампы.

2. Гибридная ХеF(C-A) лазерная система с фотохимической накачкой

Фотохимическое возбуждение активной среды происходит в результате многочисленных механизмов широкополосной оптической накачки плотных газов, причем основным механизмом является фотолиз [6], в результате которого образуются электронно-возбужденные атомы и радикалы, происходит прямое возбуждение молекул в связанное состояние, протекают вторичные фотохимические реакции возбужденных частиц, возникающих при вышеперечисленных процессах. Активная среда возбуждается УФ-ВУФ излучением ламп (включая эксимерные лампы с накачкой электронным пучком), открытым излучающим разрядом или мощными ударными волнами в благородных газах. Сочетание этой техники накачки со свойствами активной среды позволяет масштабировать фотохимические лазеры до очень высоких энергий [4, 5].

Среди разнообразия различных газовых сред с оптической накачкой, широкополосная среда ХеF(C-A), наиболее изученная в условиях свободной генерации при оптической накачке [3], чрезвычайно привлекательна для усиления фемтосекундных импульсов до ультравысоких значений пиковой мощности [6]. Параметры перехода ХеF(C-A): длина волны излучения 480 нм соответствует второй гармонике Ti:Sa лазера: спектральная ширина ~ 60 фс; радиационное время жизни 100 нс; энергия насыщения 50 мДж/см². Таким образом, эта активная среда, характеризующаяся широкой полосой усиления, позволяет усиливать 10 фс импульсы света в зелено-голубой области спектра. Нелинейное преобразование частоты во вторую гармонику наряду с низким уровнем усиленного спонтанного излучения (УСИ) (< 1 Вт/см²) могут обеспечить высокое значение контраста $\sim 10^{10}$ при усилении ультракоротких импульсов (УКИ) в гибридной ультрамощной лазерной системе задающий генератор (ЗГ) — лазерный усилитель (ЛУ). Относительно высокое значение энергии насыщения, обусловленное большим радиационным временем жизни, дает возможность достичь высоких значений плотности мощности (порядка нескольких ТВт/см²), что, учитывая возможность масштабирования к очень большим объемам, дает возможность создать лазерные системы ЗГ-ЛУ с мультитераваттной пиковой мощностью. Малые значения нелинейного коэффициента преломления и высокое значение порога пробоя активной среды позволяет непосредственно усиливать УКИ высокой мощности без использования дорогого вакуумного компрессора на основе дифракционных решеток.

Стартовый комплекс. Как и в случае КгF лазера [1], стартовый комплекс, излучающий фемтосекундные импульсы, должен генерировать импульсы с энергией ~ 1 мДж на длине волны 480 нм.

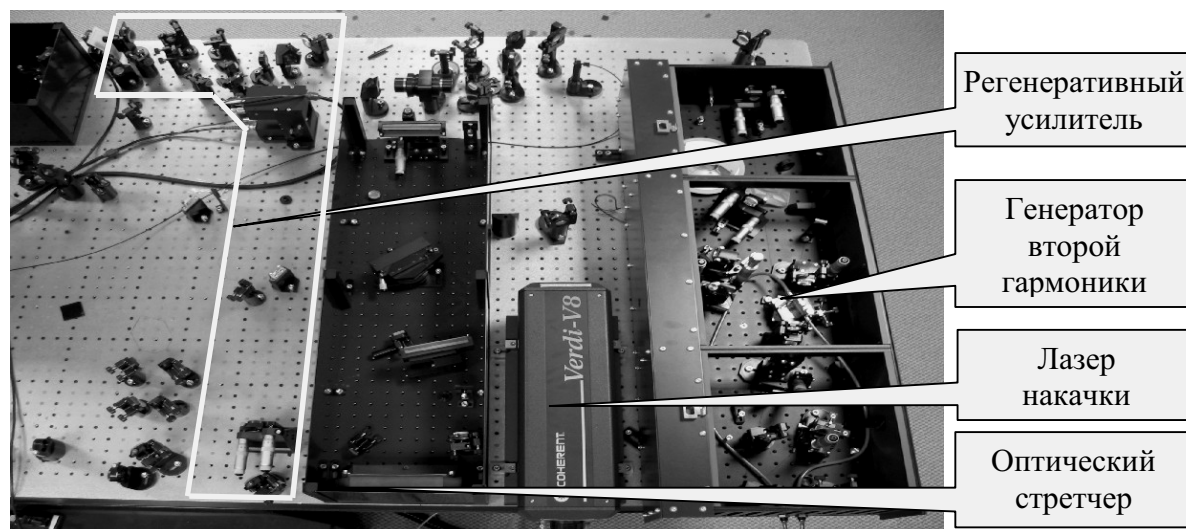


Рис. 1. Стартовый комплекс на длине волны 480 нм

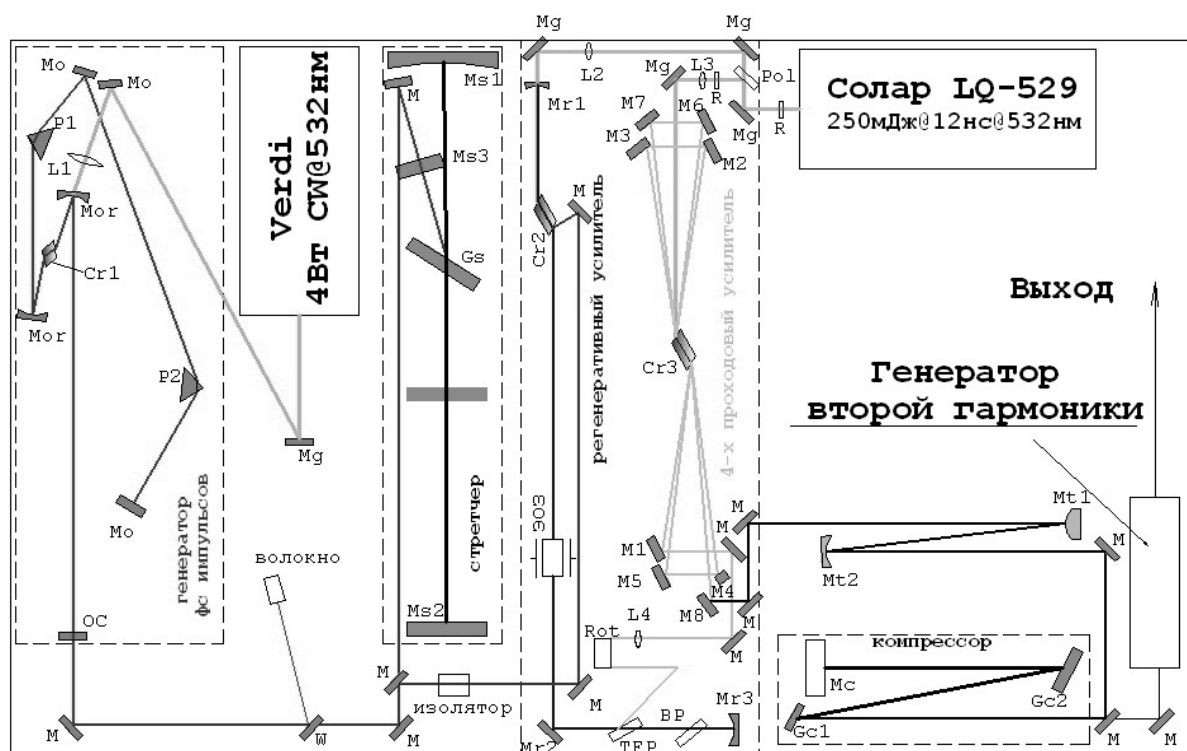


Рис. 2. Блок-схема фемтосекундного стартового лазерного комплекса на длине волны 480 нм

кундные импульсы, был разработан и изготовлен российской компанией «Авеста-проект» совместно с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН (рис. 1). Комплекс состоит из Ti:Sapphire лазера, усилителей, преобразователя частоты во вторую гармонику, и генерирует на длине волны 480 нм фемтосекундные импульсы с длительностью ~ 40 фс с энергией ~ 4 мДж. Блок-схема стартового комплекса представлена на рис. 2.

XeF(C-A) лазерный усилитель. Для экспериментальной демонстрации преимуществ новой концеп-

ции прямого усиления оптических УКИ в активной среде с фотохимической накачкой в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН был создан XeF(C-A) лазерный усилитель с фотохимической накачкой (рис. 3). Апертура усилителя $3 \times 11 \text{ см}^2$, электрическая энергия накачки, запасенная в батарее конденсаторов, 2,9 кДж. Источником оптической накачки являются многоканальные поверхностные разряды, инициируемые вдоль стенок прямоугольной диэлектрической камеры длиной 0,5 м, заполненной смесью XeF_2 , аргона и азота при давлении 1 атм.

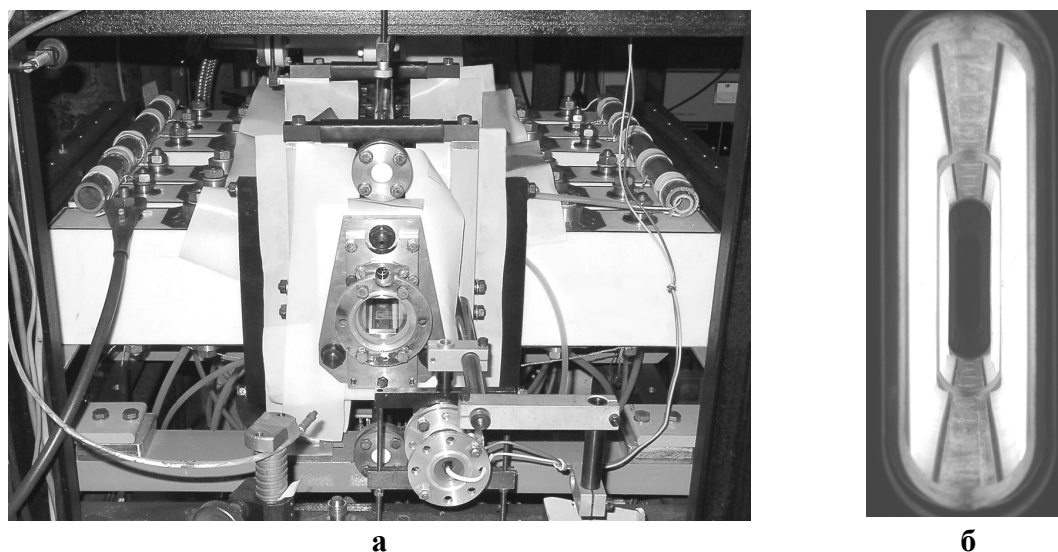


Рис. 3. Фотохимический XeF(C-A) предусилитель УКИ, созданный в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (а), и фото разрядного промежутка через окно лазерной камеры (многоканальный поверхностный разряд возбужден) (б)

Основным принципом фотохимической накачки активной среды XeF(C-A) является создание возбужденных молекул XeF(B) в результате фотодиссоциации XeF₂ под действием ВУФ излучения (120...185 нм) многоканального поверхностного разряда. Молекулы XeF(B) в присутствии буферных газов (Ar, N₂) релаксируют вследствие столкновений в верхнее лазерное состояние XeF(C). Схема накачки, в которых два таких плоских источника накачивают активную среду, размещенную между ними, обеспечивает пространственное однородное возбуждение этой среды. Численные расчеты [7] показали, что пространственное однородное усиление лазерных пучков с апертурой в несколько сантиметров возможно со степенью неоднородности коэффициента усиления меньше, чем 1 %. Прямоугольная апертура созданного усилителя обеспечивает простой подход к разработке многопроходной оптической схемы для съема энергии из активной длины порядка 50 см. В многопроходной схеме с клинообразной конфигурацией зеркал импульс излучения усиливается в активной среде, расположенной между этими зеркалами, причем возможно до 45 двойных проходов по этой активной среде. Следует отметить, что недавно были проведены предварительные эксперименты по усилению 55 и 150 фс импульсов на длинах волн 475 и 483 нм в XeF(C-A) усилителе с фотохимической накачкой [8–11]. Достигнуто усиление фемтосекундных импульсов с коэффициентом усиления слабого сигнала $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ на длине волны 480 нм при полном усилении 100.

Конечный XeF(C-A) усилитель. Другим многообещающим подходом для накачки XeF(C-A) усилителя является использование ВУФ излучения Xe₂ лампы на длине волны 172 нм, накачиваемой электронным пучком. Этот метод был использован в работе [2], где была достигнута энергия лазерного излучения 5,8 Дж. Преимуществом этого источни-

ка накачки является ее более высокая эффективность, что позволяет создать более компактный XeF(C-A) усилитель УКИ с выходной мощностью намного больше 10 ТВт. Принимая во внимание, что баланс энергии в источнике накачки и активной среде был детально исследован [2], представляется возможным проанализировать потенциал этого метода накачки для создания мультипетаваттной лазерной системы. Рассмотрим конструкцию XeF(C-A) усилителя с накачкой ВУФ излучением Xe₂ лампы диаметром 60 см, заполненной Хе при давлении 2...3 атм с накачкой электронным пучком (рис. 4). Фотолитическая ячейка, содержащая смесь XeF₂-N₂ при давлении 1 атм находится в камере гексагонального сечения, на боковой поверхности которой располагаются окна из CaF₂, прозрачные для ВУФ излучения. Эта камера располагается в конверторе, преобразующем энергию шести электронных пучков в энергию ВУФ излучения Хе₂ лампы. Давление Хе в конверторе выбирается таким образом, чтобы электроны замедлялись в слое газа между фольгой электронной пушки и окнами из CaF₂. Конструкция конечного усилителя близка к конструкции конечного KrF лазерного усилителя ДМ [1], отличающаяся от последней тем, что внутри располагается фотолитическая ячейка. Следует подчеркнуть, что конструкция конечного лазерного усилителя позволяет использовать его как для KrF, так и для XeF(C-A) лазера. Предполагается, что максимальная мощность W электронных пучков, вкладываемая в Хе в конверторе диаметром 60 см и длиной 200 см, составляет ~250 ГВт. Согласно данным, полученным в [2], полная эффективность возбуждения η состояния XeF(C) составляет ~1 %. Вследствие тушения состояния XeF(C) его реальное время жизни ~70 нс. Таким образом можно оценить полную энергию, снимаемую коротким оптическим импульсом, как $W\eta\tau=175 \text{ Дж}$. При длительности усиленного им-

пульса 25 фс эта энергия соответствует пиковой мощности ~ 7 ПВт. Принимая во внимание, что активный объем составляет 250 л, а сечение вынужденного излучения 10^{-17} см^2 , можно оценить коэффициент усиления слабого сигнала $\sim 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

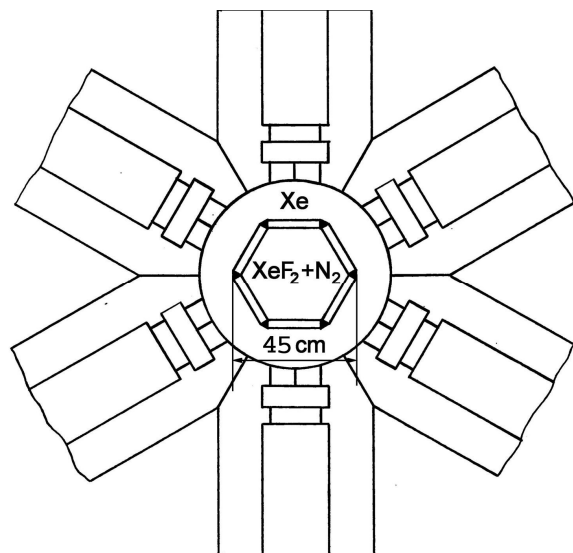


Рис. 4. Сечение конечного XeF(C-A) лазерного усилителя с электронно-пучковым конвертором

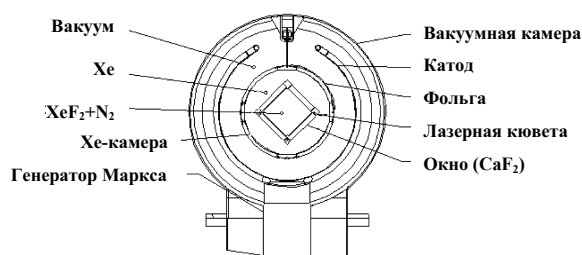


Рис. 5. Схема XeF(C-A) лазерного усилителя

В качестве промежуточного шага в Институте сильноточной электроники СО РАН в настоящее время разрабатывается другая версия XeF(C-A) лазерного усилителя (рис. 5). Он состоит из камеры-конвертора, заполненной ксеноном, лазерной ячейки, вакуумного диода и генератора Маркса. Генератор Маркса располагается в кожухе, заполненном сухой смесью воздух/SF₆ и связан с вакуумным диодом при помощи вакуумной изоляции высоковольтных частей. Такая конструкция позволяет минимизировать индуктивность цепи питания и вес ускорителя. Вакуумный диод создает четыре электронных пучка с поперечными размерами $120 \times 15 \text{ см}^2$, которые инжектируются в Xe-конвертор. Для того, чтобы гарантировать замедление электронов в конверторе при давлении Xe 3 атм, расстояние между титановой фольгой вакуумного диода и окнами из CaF₂ было выбрано равным 7,5 см. Апертура лазерной кюветы $12 \times 12 \text{ см}^2$, ее длина 128 см. Кювета заполняется смесью XeF₂/N₂ при давлении 1...2 атм. Параметры электронного пучка в вакуумном диоде: полный ток 80 кА, пиковое напряжение 420 кВ, длительность импульса на полувысоте ~ 400 нс. Полная пиковая мощность

электронов, входящих через фольгу в камеру с ксеноном составляет 16 ГВт для импульса с длительностью на полувысоте 210 нс.

Расчеты коэффициента усиления и вложенной энергии. Для упрощения численных расчетов лазерная кювета с квадратным сечением была заменена кюветой с круговым сечением такого же периметра. Согласно данным работы [2], эффективность флуоресценции ксенона, возбужденного электронным пучком, была принята равной 30 %, а эффективность преобразования ВУФ излучения, которое является произведением пропускания окон из CaF₂ и фактора расходимости, была оценена в $\eta_{\text{эф}} = 15 \%$. В этом случае плотность потока фотонов на внутренней поверхности окон из CaF₂ составляет $F_R = \eta_{\text{прпкс}} \cdot \eta_{\text{эф}} \cdot (P_{\text{пучкс}}/S)/h\omega = 1,0 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, где S – площадь боковой поверхности лазерной кюветы. Среднее сечение фотопоглощения XeF₂ на длине волны 172 нм с учетом распределения интенсивности излучения ксенона составляет $\sigma(\text{XeF}_2) = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ [2]. Расчеты пространственного распределения плотности фотонного потока $F(r)$ и концентрации XeF(C) основаны на решении нестационарных уравнений переноса излучения в цилиндрической геометрии совместно с упрощенной кинетической моделью для состояния XeF(C). Результаты расчета, полученные для коэффициента усиления слабого сигнала и для энергии, запасенной на переходе C-A, соответствующей объему накачки, приведены на рис. 6 и 7. Момент времени $t = 170$ нс соответствует максимуму коэффициента усиления слабого сигнала. Довольно од-

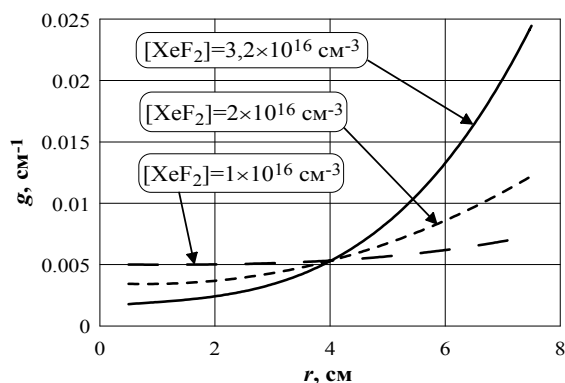


Рис. 6. Распределение коэффициента усиления по радиусу при различных концентрациях XeF₂ на момент времени $t = 170$ нс

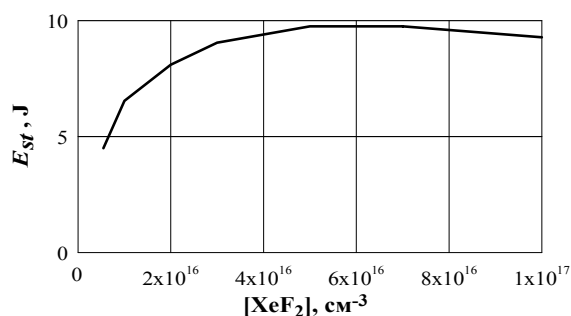


Рис. 7. Энергия, вложенная в активный объем в момент времени $t = 170$ нс

нородное распределение коэффициента усиления в активной среде может быть получено при $[XeF_2]=1\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $t=170 \text{ нс}$, причем коэффициент усиления g составляет $0,005 \text{ см}^{-1}$, а энергия запасенная в активной среде $E_{\text{ак}}=6 \text{ Дж}$. Согласно численным расчетам этого XeF(C-A) лазерного усилителя, пиковая мощность составляет 100 ТВт для лазерного импульса с длительностью 30 фс.

3. Заключение

Многокаскадные гибридные лазерные системы, генерирующие импульсы излучения с пиковой мощностью $\sim 10^{14} \dots 10^{15} \text{ Вт}$ создается в настоящее время в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН совместно с Институтом сильноточной электроники СО РАН. Отличительной особенностью проектируемых гибридных систем является прямое усиление фемтосекундных импульсов, генерируемых твердотельной лазерной системой, и прошедших через призматический стретчер с отрицательной дисперсией, в газообразных активных средах без использования в выходном пучке дорогостоящих устройств сжатия импульсов. Создаются две ги-

бридные лазерные системы, основанные на усилении УКИ на длине волны 248 нм (третья гармоника Ti:Sa-лазера) в активной среде электронно-пучкового KrF лазера [1], и на усилении на длине волны $\sim 480 \text{ нм}$ (вторая гармоника Ti:Sa-лазера) в среде фотохимического XeF(C-A)-лазера с накачкой ВУФ излучением электронно-пучковой Xe₂ лампы. Конечным каскадом XeF(C-A) лазерной системы будет являться электронно-пучковая установка с лазерной камерой диаметром 30...40 см и длиной около 2 м. Теоретически показано, что энергия лазерного импульса на выходе конечного усилительного каскада может достигать $\sim 75 \text{ Дж}$ при длительности импульса 25 фс. Ti:Sa лазерная система, генерирующая $\sim 50 \text{ фс}$ импульсы с энергией 4 мДж на длине волны 480 нм разработана и установлена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Исследования, выполненные в настоящей работе проведены в рамках научных программ Президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной и стационарной электроники высокой мощности» и «Фемтосекундная оптика и новые оптические материалы» и при поддержке Роснауки.

Работа доложена на VIII Международной конференции «Atomic and Molecular Pulsed lasers», Tomsk, 10–14 September, 2007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зворыкин В.Д., Ионин А.А., Коняшенко А.В. и др. Мощные фемтосекундные гибридные лазерные системы с широкоапертурными усилителями на основе газовых лазеров 1. Гибридная фемтосекундная KrF лазерная система // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 115–120.
2. Ekstrom D.J., Walker H.C., Jr. Multijoule performance of the photolytically pumped XeF(C>A) laser // IEEE J. Quantum Electronics. – 1982. – V. QE-18. – № 2. – P. 176–181.
3. Tittel F.K., Smayling M., Wilson W.L., Marowsky G. Blue laser action by the rare-gas halide trimer Kr₂F // Appl. Phys. Lett. – 1980. – V. 37. – P. 862–864.
4. Zarubin P.V. Academician Basov, high-power lasers and the antimissile defense problem // Quantum Electronics. – 2002. – V. 32. – № 12. – P. 1048–1064.
5. Zuev V.S., Kashnikov G.N., Mamaev S.B. XeF laser with optical pumping by surface discharges // Sov. J. Quantum Electronics. – 1992. – V. 22. – № 11. – P. 973–979.
6. Mikheev L.D. Possibility of amplification of a femtosecond pulse up to the energy 1kJ // Laser & Particle Beams. – 1992. – V. 10. – P. 473–478.
7. Malinovskii G.Ya., Mamaev S.B., Mikheev L.D. et al. Numerical simulation of the active medium and investigation of the pump source for the development of a photochemical XeF(C-A) amplifier of femtosecond optical pulses // Quantum Electronics. – 2001. – V. 31. – № 7. – P. 617–622.
8. Tcheremiskine V.I., Sentis M.L., Mikheev L.D. Amplification of ultrashort laser pulses in the photolytically driven XeF(C-A) active medium // Appl. Phys. Lett. – 2002. – V. 81. – P. 403–405.
9. Mikheev L., Levchenko K., Mamaev S. et al. Direct amplification of frequency-doubled femtosecond pulses from Ti:Sa laser in photochemically driven XeF(C-A) active media // Proc. SPIE. – 2004. – V. 5448. – P. 384–392.
10. Clady R., Coustallier G., Gastaud M. et al. Architecture of a blue high contrast multiterawatt ultrashort laser // Appl. Phys. B. – 2006. – V. 82. – P. 347–358.
11. Tcheremiskine V., Uteza O., Mislavskii V. et al. Amplification of femtosecond optical pulses in a photolytically driven XeF(C-A) laser amplifier // Proc. SPIE. – 2006. – V. 6346. – P. 634613–1–634613–8.

Поступила 23.11.2007 г.