

УДК 535:621.373.826

МОЩНЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ С ШИРОКОАПЕРТУРНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

1. ГИБРИДНАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ KrF 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 $\sim 10^4 \dots 10^5$ Вт. Эта система основана на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны 248 нм (третья гармоника Ti:Sa-лазера) в активной среде электронно-пучкового KrF лазерного усилителя. Конечным каскадом лазерной системы будет являться электронно-пучковая установка с лазерной камерой диаметром 60 см и длиной 200 см. 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. Рассматривается также возможность применения в качестве активной среды молекул Kr₂F с энергией насыщения 0,2 Дж/см² для усиления ультракоротких импульсов. Теоретически показано, что энергия лазерного импульса на выходе конечного KrF усилительного каскада может достигать ~ 17 Дж при длительности импульса ~ 50 фс. Ti:Sa лазерная система, генерирующая ~ 50 фс импульсы с энергией 0,5 мДж на длине волны 248 нм, разработана и установлена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Проведены предварительные эксперименты по усилению УФ фемтосекундных импульсов в электрооразрядном KrF лазерном усилителе.

1. Введение

В настоящее время для получения лазерных импульсов с тераваттной и петаваттной пиковой мощностью применяются чрезвычайно дорогие твердотельные лазерные системы задающий генератор (ЗГ) — лазерный усилитель (ЗГЛУ). Однако, потенциал мощных гибридных лазерных систем ЗГЛУ, в которых твердотельный ЗГ, генерирующий фемтосекундные импульсы и набор твердотельных усилителей (далее называемый стартовый комплекс) комбинируется с набором газоразрядных предусилителей и конечным каскадом — широкоапертурным усилителем, пока еще в полной мере не использован. Отличительной особенностью гибридных систем является генерация фемтосекундных импульсов в твердотельной лазерной системе и, после прохождения через призменный стретчер с отрицательной дисперсией, прямое их усиление в газообразных активных средах без использования в выходном пучке дорогостоящих устройств сжатия импульсов. Кроме того, технология создания мощных широкоапертурных газовых лазеров с электронно-пучковой накачкой, которые могут быть использованы в качестве конечных усилителей, хорошо разработана [1–25]. Опыт создания таких лазеров в Институте сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН и Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) позволяет разработать тераваттные и петаваттные оптические источники фемтосекундных импульсов на основе гибридных систем. Две гибридные лазерные системы, основанные на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны ~ 248 нм (третья гармоника Ti:Sa-лазера) в активной среде электронно-пучко-

вого KrF лазерного усилителя, и на усилении на длине волны ~ 480 нм (вторая гармоника Ti:Sa-лазера) в среде фотохимического XeF(C-A)-лазера с накачкой ВУФ излучением электронно-пучковой Xe₂ лампы, создаются в настоящее время совместными усилиями ИСЭ СО РАН и ФИАН. В настоящей статье обсуждается лазерная система на длине волны 248 нм. Вторая лазерная система, действующая на длине волны 480 нм, будет рассмотрена во второй части статьи.

2. Гибридная фемтосекундная KrF лазерная система

Экспериментальная установка. KrF лазерная система состоит из твердотельного стартового комплекса, генерирующего фемтосекундные импульсы излучения, нескольких KrF лазерных предусилителей и конечного усилителя.

Стартовый комплекс. Твердотельный стартовый комплекс, излучающий УФ фемтосекундные импульсы, был разработан и изготовлен российской компанией «Авеста-проект» совместно с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН. Этот комплекс, представленный на рис. 1, состоит из задающего генератора (Ti:Sa-лазер, длина волны излучения 744 нм, длительность импульса излучения 30 фс), оптического стретчера, регенеративного усилителя, многопроходного усилителя, оптического компрессора и преобразователя излучения в третью гармонику. Этот лазерный комплекс излучает 60 фс импульсы на длине волны третьей гармоники Ti:Sa-лазера (248 нм) с энергией излучения 0,5 мДж и с частотой следования 10 Гц. Диаметр лазерного пучка — 8 мм.

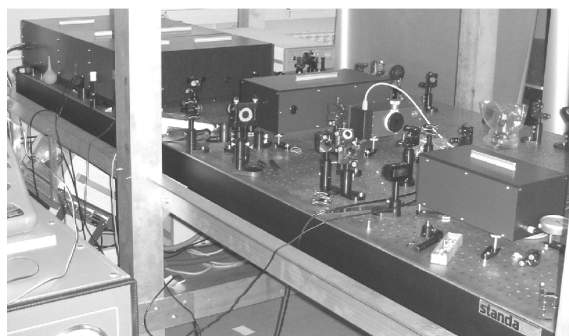


Рис. 1. Стартовый комплекс на длине волны 248 нм

Блок-схема стартового комплекса представлена на рис. 2. В лазерный комплекс входят также лазеры накачки «Finesse» для задающего генератора и «Lotis ТП» для лазерных усилителей, система для стабилизации температуры активных кристаллов, электронная система контроля и синхронизации, устройства для измерения и контроля лазерных параметров (спектрометры «ASP» на диапазоны длин волн 700...800 нм и 200...300 нм и калориметр «OPHIR»).

KrF лазерные предусилители. Были проведены предварительные эксперименты по усилению УФ фемтосекундных импульсов излучения в промышленном электроразрядном KrF лазере «Lambda Physik», используемом в качестве лазерного предусилителя. Применялась двухпроходная схема усиления. Экспериментальные условия были следующими: частота повторения импульсов 10 Гц, длительность импульса излучения на входе предусилителя ~60 фс, энергия одиночного импульса 0,5 мДж. При синхронизации входного лазерного импульса с максимумом инверсной населенности в предусилителе, энергия излучения на его выходе достигала 3 мДж при полном коэффициенте усиления ~6. Следует отметить, что плотность энергии излучения на выходе превышала энергию насыщения для KrF лазера (~2 мДж/см²).

Следующий предусилитель «Бердыш» (рис. 3) имеет активный объем 10×10×100 см³. Его возбуждение осуществляется электронным пучком с плотностью тока 40 А/см², длительностью импульса то-

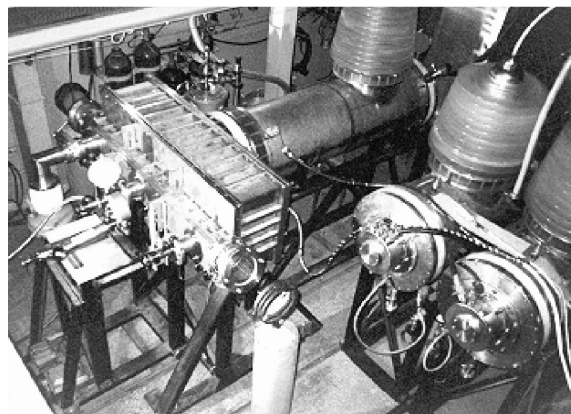


Рис. 3. KrF лазерный предусилитель «Бердыш»

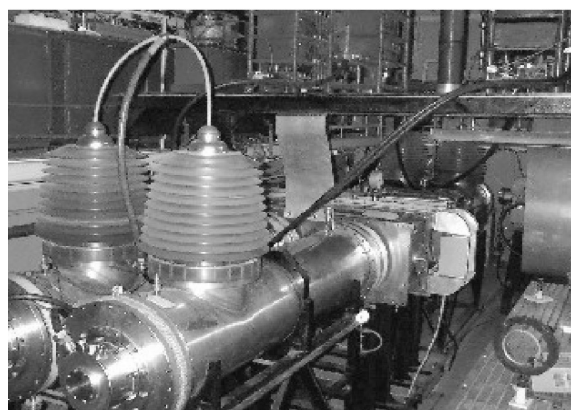


Рис. 4. KrF лазерный предусилитель «Гарпун»

ка 80 нс и полной энергией 900 Дж. Электронный пучок стабилизируется импульсным магнитным полем. Питание электронной пушки, формирующей этот электронный пучок, осуществляется двойной формирующей линией, связанной с генератором Маркса с запасом энергии 3,6 кДж. Другой предусилитель «Гарпун» [9, 15] (рис. 4) с активным объемом 16×18×100 см³ накачивается двумя электронными пучками с плотностью тока 50 А/см², распространяющимися навстречу друг другу. Эти пучки генерируются двумя электронными пушками и направляются в лазерную камеру через титановую фольгу. Питание электронных пушек осу-

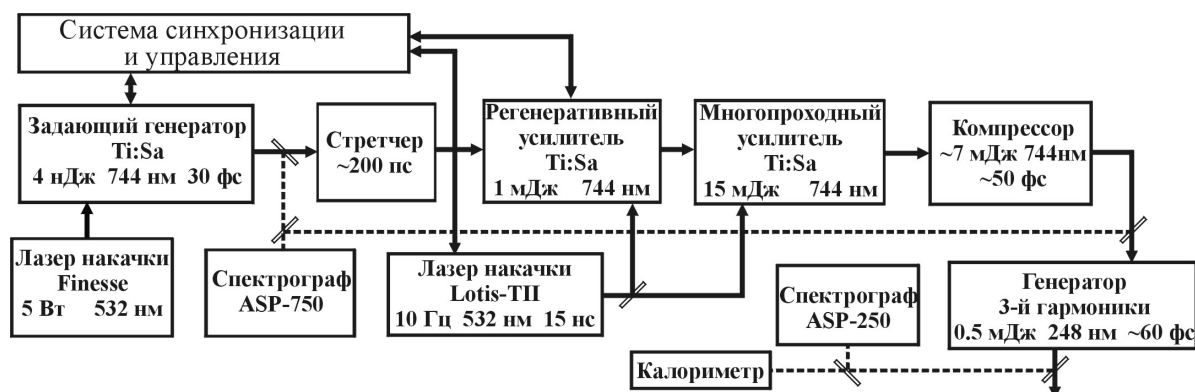


Рис. 2. Блок-схема фемтосекундного стартового комплекса на длине волны 248 нм

шестьвается импульсами напряжения с амплитудой 350 кВ и длительностью 100 нс, формируемыми четырьмя двойными формирующими линиями, заряжаемыми от 7-ступенчатого генератора Маркса с напряжением в ударе 500 кВ и запасаемой энергией 14 кДж. Полная энергия, вкладываемая в активный объем, и удельная вкладываемая мощность составляют 2 кДж и 0,8 МВт/см³, соответственно. Для пространственной стабилизации электронных пучков используется импульсное магнитное поле 0,8 кГс с длительностью импульса 250 мс. Неоднородность вкладываемой мощности не превышает 20 % при давлении газа 1,5...1,75 атм для газовой смеси Ar/Kr/F_2 .

Конечный KrF лазерный усилитель. Конечный KrF усилитель создается на основе опыта, приобретенного в Институте сильноточной электроники СО РАН при разработке мощного лазера [20–24], накачиваемого радиально сходящимися электронными пучками. Однако, в качестве источника питания вместо генератора Маркса будет использован линейный трансформатор [20–24]. Конечный каскад усиления лазерного импульса (в дальнейшем будем называть его ДМ) представляет собой газовую кювету с длиной 2000 мм и выходной апертурой 400...600 мм. Для возбуждения рабочей смеси Ar/Kr/F_2 при давлении 1...3 атм предполагается использовать многостороннюю накачку импульсными электронными пучками, формирование которых осуществляется вакуумными диодами со взрывоэмиссионными катодами, работающими в микросекундном диапазоне времени. Источником питания диодов являются импульсные генераторы на базе линейных трансформаторов с вакуумной изоляцией вторичного витка, что позволяет устанавливать взрывоэмиссионные катоды без использования проходных изоляторов. Аналогичный подход был использован ранее при создании XeCl-лазера с активным объемом 200 литров [22–24]. Внешний вид создаваемого конечного усилителя лазерных импульсов представлен на рис. 5.

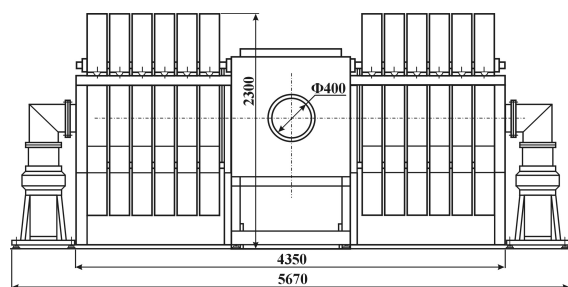


Рис. 5. Конечный лазерный усилитель ДМ

Линейный трансформатор представляет собой сборку из последовательно соединенных элементов — ступеней. Выходное напряжение генератора определяется количеством последовательно соединенных ступеней и величиной зарядного напряжения ступени. Энергозапас генератора в целом определяется энергозапасом каждой ступени и их количеством. Упрощенная схема ступени линейного

трансформатора показана на рис. 6. Накопительный конденсатор C , разрядник S и ферромагнитный сердечник F встроены в корпус ступени без использования каких-либо кабелей в первичном витке. Высоковольтный вывод ступени расположен на ее оси, нагрузка Z включена в разрыв вторичного витка. Такая конструкция полностью изолирует первичный виток от вторичного и обеспечивает минимальную индуктивность подводов к вторичному витку. Вторичный виток отделен от первичного вакуумноплотным изолятором, что позволяет достигать внутри вторичного витка высокий вакуум, необходимый для работы взрывоэмиссионного диода, который в данной схеме является нагрузкой.

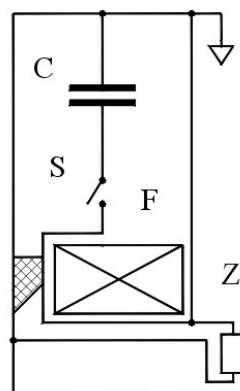


Рис. 6. Схема ступени импульсного линейного трансформатора

Объем активной зоны конечного усилительного каскада при диаметре 600 мм и длине 2000 мм составляет ~600 л. Энергия электронов пучка при этом должна быть 500...600 кэВ. При удельной мощности накачки 300 кВт/см³ требуемая мощность электронного пучка в газе составляет 0,18 ТВт; при мощности накачки 500 кВт/см³ — 0,3 ТВт. Энергия, введенная в газ, при длительности импульса 250 нс составляет 45 кДж при мощности 300 кВт/см³ и 75 кДж при мощности 500 кВт/см³. С учетом потерь 50 % тока электронов за счет геометрической прозрачности выводного окна ускорителя, потерь в фольге выводного окна и утечек в вакууме с высоковольтных элементов диода, необходимая величина энергозапаса генератора может быть оценена на уровне 150 кДж. Если уровень потерь при коммутации конденсаторов накопителя искровыми разрядниками и возможных утечек при использовании трансформаторной схемы принять ~30 % от запасаемой в конденсаторах энергии, то необходимый начальный энергозапас генератора составляет ~190 кДж. Для обеспечения необходимых параметров ускорителя линейный трансформатор должен содержать 12 ступеней, каждая из которых состоит из 20 блоков. Блок трансформаторной ступени содержит два параллельно включаемых через многозазорный разрядник импульсных конденсатора емкостью по 0,04 мкФ, заряжаемых до 100 кВ. Таким образом емкость первичного накопителя составляет ~38 мкФ и содержит примерно 950 конденсаторов.

В настоящее время созданы и испытаны блоки и ступень линейного трансформатора. Результаты свидетельствуют о том, что средняя удельная мощность, вводимая в газ, при использовании данных конструктивных решений близка к 500 кВт/см^3 . Для устойчивой работы ускорителя необходимо использовать в качестве нагрузки диод с сопротивлением $0,7 \text{ Ом}$; в этом режиме ток пучка на аноде будет равняться $\sim 45...60 \text{ А/см}^2$.

3. Теоретические расчеты

Усиление ультракоротких фемтосекундных импульсов. Параметры рабочего перехода $\text{KrF}(B-X)$: длина волны 248 нм ; спектральная ширина $\sim 10 \text{ нм}$; спектрально-ограниченная длительность $\sim 20 \text{ фс}$; радиационное время жизни 6 нс ; сечение вынужденного перехода $2,6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$; энергия насыщения 2 мДж/см^2 . Особенностью усиления ультракоротких импульсов (УКИ) в активной среде лазерного KrF усилителя является относительно низкое значение энергии насыщения. В связи с этим, для достижения высоких энергий излучения необходимо использовать широкоапертурные усилители. В работе [25] сообщалось об усилении 60 фс импульсов. Достигнута выходная пиковая мощность 4 ТВт при плотности энергии 5 мДж/см^2 для субпикосекундных импульсов [26]. Эти результаты дают надежду на достижение пиковой мощности $\sim 1 \text{ ПВт}$ в KrF конечном усилителе с апертурой 600 мм (площадь $\sim 3000 \text{ см}^2$) при условии достижения энергии $\sim 15 \text{ Дж}$ в спектрально ограниченном импульсе излучения длительностью $\sim 20 \text{ фс}$. В разрабатываемой системе, импульс третьей гармоники Ti:Sa стартового комплекса длительностью $\sim 50 \text{ фс}$ с энергией $0,1 \text{ мДж}$ предварительно уширяется в стретчере с отрицательной дисперсией, а затем направляется в двухпроходные лазерные усилители «Бердыш», «Гарпун» и ДМ (рис. 7).

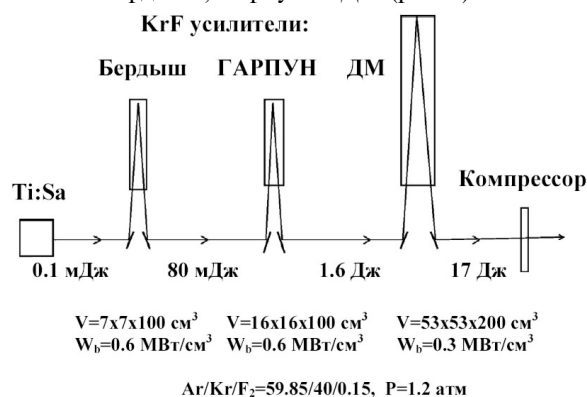


Рис. 7. Схема усиления одиночного УКИ в каскаде KrF усилителей, для каждого из которых указаны выходная энергия, размеры (V) и удельная мощность накачки (W_b)

Двухпризмный стретчер растягивает $\sim 50 \text{ фс}$ импульс до $0,3...1 \text{ пс}$. Последовательно проходя через лазерные усилители и их выходные окна с положительной дисперсией импульс излучения усиливается и сжимается. На выходе усилительных каскадов устанавливается также дополнительная

плоскопараллельная пластина(ы) с положительной дисперсией в качестве временного компрессора. Подбором толщины пластины компенсируется отрицательный «чирп», внесенный в усиливаемый импульс двухпризмным стретчером. Конечная длительность усиливаемого импульса может быть определена только экспериментально.

Численные расчеты широкоапертурных KrF усилителей для УКИ были выполнены на основе теории, разработанной в [27]. Поскольку коэффициент усиления в активной среде KrF лазера достаточно высок, достаточно использовать двухпроходную геометрию усиления с одним отражающим зеркалом. Результаты расчетов представлены в форме зависимостей плотности энергии излучения на выходе усилителя от плотности энергии на его входе, нормированных на энергию насыщения импульса Q_s , которая слабо зависит от длительности импульса в диапазоне $50 \text{ фс}...10 \text{ пс}$ и изменяется в пределах $2...3 \text{ мДж/см}^2$. Пример расчетов для конечного каскада (ДМ) представлен на рис. 8, а.

На рис. 8, б, приведена зависимость удельной выходной энергии от относительной длины усиления. Теоретические расчеты демонстрируют (рис. 7 и 8), что выходная энергия одиночного импульса на выходе KrF предусилителя «Бердыш», предусилителя «Гарпун» и конечного усилителя ДМ составляет 80 мДж , $1,6 \text{ Дж}$ и $\sim 17 \text{ Дж}$, соответственно. Таким образом можно ожидать достижения пиковой мощности $\sim 350 \text{ ТВт}$ в конечном усилителе ДМ при условии, что длительность импульса излучения на его выходе составит $\sim 50 \text{ фс}$. Предполагается, что первые эксперименты по усилению УКИ в каскаде KrF лазерных усилителей будут выполнены с предусилителями «Бердыш» и «Гарпун» с энергией $1,6 \text{ Дж}$ и пиковой мощностью $\sim 30 \text{ ТВт}$ на выходе. Эти усилители рассматриваются как прототипы предусилителей, применяемых в дальнейшем в системе с конечным усилителем ДМ.

Одновременное усиление ультракоротких и длинных импульсов в электронно-пучковых KrF лазерных усилителях. Активная среда KrF лазера обладает уникальной возможностью одновременного усиления ультракоротких и относительно длинных, наносекундных, импульсов, что может быть использовано при применении концепции быстрого поджига в лазерном термоядерном синтезе с KrF лазерными драйверами [28, 29]. В этом случае длинные импульсы используются для сжатия мишени, а ультракороткие — для ее поджига. При усилении наносекундных ($\sim 5 \text{ нс}$) импульсов, для максимального эффективного использования накачки мощного электронно-пучкового KrF усилителя, длительность которой по техническим причинам составляет сотни наносекунд, необходимо применение оптической схемы мультиплексирования [30]. Поскольку характерное время восстановления инверсии в активной среде электронно-пучкового KrF лазера после прохождения одиночного УКИ составляет $\sim 2 \text{ нс}$ (что меньше времени жизни верхнего

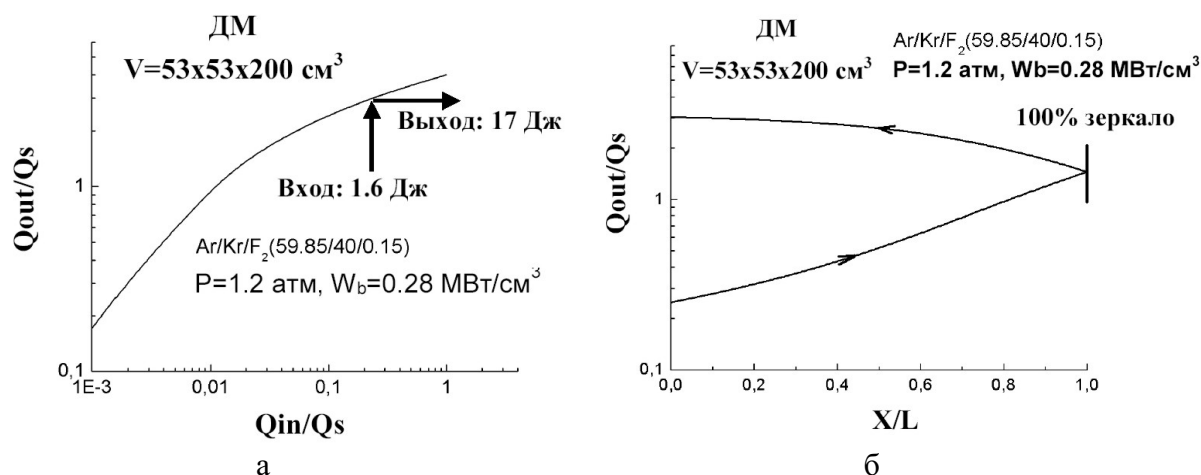


Рис. 8. Энергия излучения УКИ, нормированная на энергию насыщения на выходе конечного усилителя (Q_{out}/Q_s) с активным объемом $V=53 \times 53 \times 200 \text{ см}^3$ в зависимости от энергии импульса на входе (Q_{in}/Q_s) (а) и приведенной длины (X/L) усиления (б)

лазерного уровня перехода $B-X$ в молекуле KrF), усиление одиночных УКИ в этих лазерах слабо сказывается на эффективности усиления цуга перекрывающихся наносекундных импульсов с общей длительностью 100...200 нс. Кроме того, усиление длинных импульсов имеет дополнительное преимущество: инверсная населенность уменьшается и, соответственно, уменьшается усиленное спонтанное излучение (УСИ), которое может приводить к низкому контрасту УКИ. Численные расчеты такой лазерной системы были выполнены на основе квазистационарной модели KrF лазера, являющейся, по существу, обобщением известного в теории переноса излучения приближения «вперед-назад», как для УКИ, так и для УСИ [31]. В то время как энергия излучения одиночного УКИ на выходе конечного каскада достигает ~ 17 Дж; для 250 нс цуга наносекундных импульсов энергия излучения составляет 4,0 кДж. В принципе, возможно усиление цуга фемтосекундных УКИ, в результате чего суммарная выходная энергия может достигать аналогичного уровня. Однако, проблема доставки и суммирования УКИ на мишени является довольно сложной.

Усиление на переходе Kr_2F . Другим подходом к усилению УКИ импульсов в активной среде KrF лазерного усилителя является усиление на переходе $4^2G \rightarrow 1,2^2G$ молекулы Kr_2F [29]. В настоящее время установлено, что в молекулах Kr_2F^* , излучающих в широкой полосе с центром на длине волны 420 нм (что соответствует второй гармонике $Ti:Sa$ лазера), плотность энергии насыщения превосходит на два порядка соответствующую величину для молекулы KrF^* и составляет 0,2 Дж/см², что уже близко к плотности энергии насыщения самого $Ti:Sa$ лазера ($\sim 0,8$ Дж/см²). Этот факт открывает принципиальную возможность достижения мощности в десятки петаватт на выходе усилителя ДМ, работающего на молекулах Kr_2F^* . Однако до сих пор на молекулах Kr_2F^* получена только генерация в режиме длинных импульсов [32], а усиление УКИ

совсем не исследовалось. Основными проблемами при усилении здесь являются низкое значение коэффициента усиления, что требует применения многопроходных схем усиления, и нестационарное поглощение излучения продуктами плазмохимических реакций, протекающих в результате воздействия электронного пучка. Влияние последнего фактора может быть уменьшено путем оптимизации накачки лазерной смеси. При этом условии численный расчет энергии фемтосекундных УКИ на выходе многопроходной лазерной системы на переходе Kr_2F ($4^2G \rightarrow 1,2^2G$) с конечным усилителем ДМ дает величину ~ 500 Дж. Таким образом, в такой системе достижима, в принципе, пиковая мощность в несколько ПВт.

4. Заключение

Многокаскадные гибридные лазерные системы, генерирующие импульсы излучения с пиковой мощностью $\sim 10^{14} \dots 10^{15}$ Вт создаются 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 призменный стретчер с отрицательной дисперсией, в газообразных активных средах без использования в выходном пучке дорогостоящих устройств сжатия импульсов. Создаются две гибридные лазерные системы, основанные на усилении фемтосекундных импульсов на длине волны 248 нм (третья гармоника $Ti:Sa$ -лазера) в активной среде электронно-пучкового KrF лазера, и на длине волны ~ 480 нм (вторая гармоника $Ti:Sa$ -лазера) в среде фотохимического $XeF(C-A)$ -лазера с накачкой ВУФ излучением электронно-пучковой Xe_2 лампы. Конечным каскадом KrF лазерной системы будет являться электронно-пучковая установка с лазерной камерой диаметром 60 см и длиной 200 см. Рассматривается также возможность при-

менения в качестве активной среды молекул Kr_2F с энергией насыщения $0,2 \text{ Дж/см}^2$ для усиления ультракоротких импульсов. Теоретически показано, что энергия лазерного импульса на выходе KrF конечного усилительного каскада может достигать $\sim 17 \text{ Дж}$ при длительности импульса $\sim 50 \text{ фс}$. Ti:Sa лазерная система, генерирующая $\sim 50 \text{ фс}$ импульсы с энергией $0,5 \text{ мДж}$ на длине волны 248 нм разработана и установлена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Проведены предварительные

эксперименты по усилению УФ фемтосекундных импульсов в электроразрядном KrF лазерном усилителе.

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

- Swingle J.C., Schlitt L.G., Rapaport W.R. et al. Efficient Narrowband Electron Beam Pumped KrF Laser for Pulse-Compression Studies // J. Appl. Phys. – 1981. – V. 52. – P. 91–96.
- Ekstrom D.J., Walker H.C., Jr. Multijoule Performance of the Photochemically Pumped XeF(C-A) Laser // IEEE J. Quantum Electron. – 1982. – V. QE-18. – № 2. – P. 176–181.
- Rosocha L.A., Bowling P.S., Burrows M.D. et al. An Overview of Aurora: A Multikilojoule KrF Laser System for Inertial Confinement Fusion // Laser & Particle Beams. – 1986. – V. 4. – P. 55–70.
- Rosocha L.A., Hanlon J.A., McLeod J. et al. Aurora Multikilojoule KrF laser system prototype for inertial confinement fusion // Fusion Technology. – 1987. – V. 11. – P. 497–531.
- Owadano Y., Okuda I., Matsumoto Y. et al. Development of a high-power KrF laser system, ASHURA // Laser & Particle Beams. – 1989. – V. 7. – P. 383–392.
- Shaw M.J. Prospects for high-power KrF lasers // Laser & Particle Beams. – 1991. – V. 9. – P. 309–328.
- Shaw M.J., Bailly-Salins R., Edwards B. et al. Development of high-performance KrF and Raman laser facilities for inertial confinement fusion and other applications // Laser & Particle Beams. – 1993. – V. 11. – P. 331–346.
- Harris D.B., Allen G.R., Berggren R.R. et al. Strengths and weaknesses of KrF lasers for inertial confinement fusion applications learned from the AURORA laser // Laser & Particle Beams. – 1993. – V. 11. – P. 323–330.
- Basov N.G., Bakaev V.G., Zvorykin V.D. et al. Thermonuclear gain of ICF targets with direct heating of ignitor // J. Sov. Laser Res. – 1993. – V. 14. – P. 326–359.
- Abdullin E.N., Koval'chuk B.M., Tarasenko V.F. et al. High power compact laser with $\lambda=308$ and 249 nm pumped by a radially converging electron beam // Quantum Electronics. – 1993. – V. 23. – № 7. – P. 564–567.
- Owadano Y., Okuda I., Matsumoto Y. et al. Performance of the ASHURA KrF laser and its upgrading plan // Laser & Particle Beams. – 1993. – V. 11. – P. 347–351.
- Obenschain S.P., Bodner S.E., Colombant D. et al. The Nike KrF laser facility: Performance and initial target experiments // Phys. Plasmas. – 1996. – V. 3. – P. 2098–2107.
- Owadano Y., Okuda I., Yashiro E. et al. Super-ASHURA KrF Laser Development // Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research: Proc. 15th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vienna: International Atomic Energy Agency. – 1996. – V. 3. – P. 121–127.
- Pawley C.J., Gerber K., Lehmborg R.H. et al. Measurements of laser-imprinted perturbations and Rayleigh-Taylor growth with Nike KrF laser // Phys. Plasmas. – 1997. – V. 4. – P. 1969–1977.
- Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and target experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN // Laser & Particle Beams. – 1999. – V. 17. – P. 69–88.
- Zvorykin V.D., Arlantssev S.V., Bakaev V.G. et al. Transport of electron beams and stability of optical windows in high-power e-beam-pumped krypton fluoride lasers // Laser & Particle Beams. – 2001. – V. 19. – P. 609–622.
- Sethian J.D., Myers M., Giuliani J.L. et al. Development of Krypton Fluoride lasers for Fusion Energy // In: Inertial Fusion Science and Applications. – 2003. (American Nuclear Society Inc. 2004). – P. 517–522.
- Sethian J.D., Friedman M., Giuliani J.L. et al. Electron Beam Pumped KrF lasers for Fusion Energy // Phys. Plasmas. – 2003. – V. 10. – № 5. – P. 2142–2146.
- Wolford M.F., Hegeler F., Myers M.C. et al. Electra: Repetitively pulsed, 500 J, 100 ns, KrF oscillator // Appl. Phys. Letts. – 2004. – V. 84. – P. 326–328.
- Abdullin E.N., Koval'chuk B.M., Tarasenko V.F. et al. A 650-J XeCl laser // Quantum Electronics. – 2004. – V. 34. – № 3. – P. 199–302.
- Bugaev S.P., Mesyats G.A., Tarasenko V.F. et al. A 2-kJ wide-aperture XeCl laser // Quantum Electronics. – 2004. – V. 34. – № 9. – P. 801–804.
- Kovalchuk B.M., Abdullin E.N., Grishin D.M. et al. Linear transformer accelerator for the excimer laser // Laser and Particle Beams. – 2003. – V. 21. – P. 219–222.
- Abdullin E.N., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M. et al. High-power wide-aperture electron-beam-pumped lasers on dense gases // Laser Physics. – 2006. – V. 16. – № 1. – P. 89–103.
- Лосев В.Ф., Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф. и др. Широкоапертурная эксимерная лазерная система // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 1. – С. 33–38.
- Szatmari S., Schafer F.P. Simplified laser system for the generation of 60 fs pulses at 248 nm // Opt. Comm. – 1988. – V. 68. – P. 196–199.
- Endoh A., Watanabe M., Sarukara N., Watanabe S. Multiterawatt subpicosecond KrF laser // Opt. Letts. – 1989. – V. 14. – № 7. – P. 353–355.
- Kannari F. Multilevel model analysis of energy extraction from a KrF laser medium by short pulses // J. Appl. Phys. – 1990. – V. 67. – № 9. – P. 3954–3963.
- Zvorykin V.D., Arlantssev S.V., Bakaev V.G. et al. Physical and technological issues of KrF laser drivers for inertial fusion energy // J. de Physique IV. – 2006. – V. 133. – P. 567–573.
- Molchanov A.G. Short pulse amplification in a KrF-laser and the petawatt excimer laser problem // J. de Physique IV. – 2006. – V. 133. – P. 665–669.
- Ewing J.J., Haas R.A., Swingle J.C. et al. Optical pulse compressor systems for laser fusion // IEEE J. Quantum Electron. – 1979. – V. QE-15. – № 5. – P. 368–379.
- Молчанов А.Г. Теория активных сред эксимерных лазеров // Труды ФИАН. – 1986. – Т. 171. – С. 54–127.
- Tittel F.K., Smayling M., Wilson W.L., Marowsky G. Blue laser action by the rare-gas halide trimer Kr_2F // Appl. Phys. Lett. – 1980. – V. 37. – P. 862–864.

Поступила 23.11.2007 г.