

# Фемтосекундная лазерная система на основе тонких стержневых активных Yb:YAG-элементов с высокими значениями средней мощности и энергии импульсов излучения

Ч.Янг, Ч.В.Ким, Е.Г.Салль, Б.Ли, В.Джонг, С.Парк, Ч.Ким, В.Е.Яшин, Г.Х.Ким

*Разработана и создана трехкаскадная лазерная усилительная система на основе тонких стержней из Yb:YAG с лазерной диодной накачкой. Непрерывная последовательность фемтосекундных импульсов от задающего Yb:KGW-генератора с частотой следования 80 МГц и первоначальной длительностью 150 фс прореживалась ячейкой Пококельса до частоты 0.25–1 МГц и усиливалась в системе более чем в 6500 раз до средней мощности свыше 100 Вт. Для подавления самофокусировки импульсы удлинялись в стретчере на объемной брэгговской дифракционной решетке, усиливались и затем сжимались до 947 фс. Энергия сжатых после усиления фемтосекундных импульсов при разных частотах следования превышала 100–170 мкДж, что позволяет их использовать для эффективной микрообработки различных материалов.*

**Ключевые слова:** лазерные усилители на Yb:YAG-стержнях, диодная накачка, высокие средняя мощность и энергия излучения, фемтосекундные импульсы.

## 1. Введение

Использование тонких стержней диаметром около 1 мм в качестве активных лазерных элементов позволяет существенно подавить паразитные термофизические процессы и тем самым поднять среднюю мощность и яркость генерируемого или усиливаемого излучения по сравнению с активными элементами большего размера. В результате средняя мощность излучения лазеров на тонких стержнях из Yb:YAG достигает уже сотен ватт при хорошем качестве пучка [1, 2]. Значительная часть таких лазеров работает по схеме «задающий генератор–лазерный усилитель» (МОРА) без использования метода усиления чирпированных импульсов (СПА). Усиление в такой среде, как Yb:YAG, имеющей достаточно узкую полосу усиления, обычно приводит к значительному сужению спектра усиливаемых лазерных импульсов длительностью 100 фс и их существенному (до 1000 фс и более) удлинению [1–3]. Кроме того, достижимая энергия импульсов в системах прямого усиления ограничивается самофокусировкой на уровне нескольких микроджоулей, что недостаточно для ряда применений, например для обработки материалов [4, 5].

В настоящей работе, являющейся продолжением [3], подробно исследовано усиление последовательности чирпированных 100-пс лазерных импульсов, следующих с частотой 0.25–1 МГц, в трехкаскадном усилителе на тонких стержнях из Yb:YAG до средней мощности более 100 Вт. Удлинение 150-фс импульсов от задающего Yb:KGW-генератора осуществлялось в стретчере на объемной чир-

пированной брэгговской дифракционной решетке. С помощью такой же решетки происходило и сжатие импульса до 947 фс. Такое относительно большое увеличение длительности по сравнению с исходной связано с эффектом сужения спектра в усилителях с достаточно высоким коэффициентом усиления [6], а также с недостаточно хорошим качеством дифракционной решетки. Тем не менее сжатым импульсам такой субпикосекундной длительности присущи все преимущества сверхкоротких импульсов для обработки материалов [4, 5].

Некоторые характеристики отдельных усилителей на тонких стержнях и результаты численного моделирования их параметров описаны в работе [7]. В более ранней нашей работе [8] кратко сообщалось о получении средней мощности 100 Вт в системе прямого усиления без СПА, а в работе [3] эта система прямого усиления обсуждалась подробно.

## 2. Экспериментальная установка

Оптическая схема лазерной системы показана на рис.1. Система состоит из фемтосекундного задающего генератора (ЗГ) на основе кристалла Yb:KGW, схемы понижения частоты следования импульсов на основе ячейки Пококельса, стретчера, трех усилительных модулей на тонких стержнях из кристалла Yb:YAG и компрессора. Задающий генератор ранее использовался нами в усилительной системе на Yb:KGW [9] и генерировал непрерывную последовательность лазерных импульсов длительностью 120 фс с частотой следования 80 МГц. Центральная длина волны излучения Yb:KGW-генератора,  $\lambda = 1035$  нм, отличается от центральной длины волны  $\lambda = 1030$  нм усилителей на Yb:YAG, что несколько снижает усиление, в особенности при слабом сигнале. По этой причине мы оптимизировали коэффициент отражения выходного зеркала ЗГ так, чтобы сдвинуть его центральную длину волны на  $\lambda = 1030$  нм. Средняя мощность излучения модифицированного ЗГ составила

J.Yang, J.W.Kim, E.G.Sall, B.Lee, B.Jeong, S.Park, C.Kim, G.H.Kim. Electro-Medical Device Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, 111 Hangeaul-ro Sangnok-gu Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Republic of Korea; e-mail: ghkim@keri.re.kr  
В.Е.Яшин. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кривенковский просп., 49; e-mail: Vladimир\_Yashin@mail.ru

Поступила в редакцию 7 июля 2021 г.

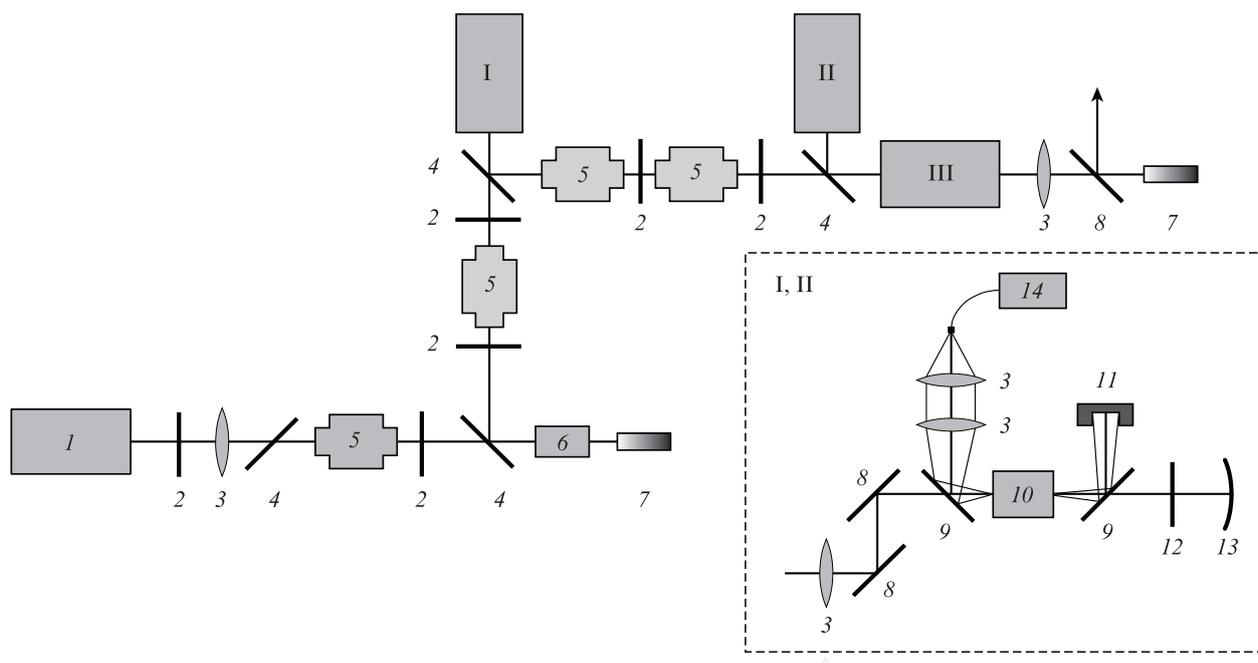


Рис.1. Схема фемтосекундной лазерной системы с усилителем на тонких стержнях:

I и II – первый и второй двухпроходные каскады усиления; III – третий однопроходный каскад усиления; 1 – задающий генератор на Yb:KGW; 2 – полуволновые пластинки; 3 – линзы; 4 – тонкопленочные поляризаторы; 5 – изоляторы Фарадея; 6 – ячейка Поккельса; 7 – chirpированная объемная брэгговская решетка; 8 – зеркала с высоким коэффициентом отражения; 9 – дихроичное зеркало; 10 – тонкие стержневые активные элементы; 11 – поглотитель излучения; 12 – четвертьволновая пластинка; 13 – вогнутое зеркало; 14 – линейка лазерных диодов накачки.

2.6 Вт, а длительность импульса – 150 фс. Средняя мощность входящего в усилительную систему излучения падала до 5–20 мВт при уменьшении частоты следования в пределах 0.25–1 МГц с помощью ячейки Поккельса. В схеме усиления частично использовались усилительные модули с геометрией, отличающейся от описанной в работе [3].

Два первых усилительных каскада работали по двухпроходной схеме с четвертьволновой развязкой. В первом каскаде использовался усилительный Yb:YAG-модуль с активным элементом диаметром 1 мм и длиной 15 мм с концентрацией иттербия 2.5 ат. % (Shasta), разработанный в Федеральном исследовательском центре Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН) [10, 11]. Усилитель накачивался лазерной диодной линейкой с волоконным выходом диаметром 105 мкм (JDSU) с максимальной мощностью 150 Вт на длине волны 940 нм. Излучение линейки фокусировалось дублетом линз в объем активного элемента в пятно диаметром около 300 мкм. Лазерный пучок от ЗГ фокусировался в активный элемент таким образом, чтобы обеспечить оптимальное перекрытие его с пучком накачки. Усиленное лазерное излучение коллимировалось сферической линзой после прохождения через тонкопленочный поляризатор.

Во втором каскаде, разработанном в ИПФ РАН [10, 11], использовался активный элемент диаметром 1 мм и длиной 19 мм с содержанием иттербия 2 ат. %. Накачка усилителя осуществлялась таким же полупроводниковым лазерным модулем, что и накачка первого усилителя в данной оптической схеме.

Третий усилительный каскад на основе модуля Taranis [12] с активным элементом Yb:YAG диаметром 1 мм и длиной 30 мм с концентрацией иттербия 1 ат. % накачивался комбинированным модулем, состоящим из четырех полупроводниковых лазеров (BWT); мощность каждого лазера на выходе волокна диаметром 105 мкм составляла

150 Вт. Максимальная мощность модуля накачки была равна 600 Вт на выходе 200-мкм волокна. Третий усилитель работал в однопроходном режиме для предотвращения самовозбуждения усилительной системы с высоким коэффициентом усиления. Уровень мощности излучения на входе в третий усилитель был близок к плотности мощности насыщения, что позволяло обеспечивать съем значительной доли запасенной в усилителе мощности.

Поскольку лазерная система обладала значительным усилением (более 6500), в ней для предотвращения самовозбуждения схемы использовались изоляторы Фарадея, установленные после ЗГ и между первым и вторым усилителями.

Частота следования импульсов изменялась в пределах 0.25–1 МГц с помощью ячейки Поккельса на кристалле ВВО, работавшей в двухпроходной схеме (см. рис.1), где в качестве зеркала служила объемная брэгговская дифракционная решетка. Такое техническое решение позволило сделать схему более компактной.

Для реализации режима усиления chirpированного импульса исходный лазерный импульс удлинялся с помощью этой дифракционной решетки, а после усиления сжимался в компрессоре на основе такой же решетки. В стретчере и компрессоре использовались два типа объемных брэгговских chirpированных решеток (Optigrate) [13]. Решетки первого типа согласно паспортным данным имели максимум отражения на длине волны 1034.9 нм, спектральную ширину полосы отражения 26.2 нм, дисперсию 12.4 пс/нм и сравнительно низкую дифракционную эффективность – 72.6%. Длительность растянутого импульса после решетки составляла около 100 пс при ширине спектра 7.5 нм. Обратное сжатие импульса без его усиления приводило к удлинению исходного импульса с 120 до 192 фс, что характеризует качество и согласованность используемых решеток. Кроме этих решеток, в стретчере и

компрессоре использовались дифракционные решетки с максимумом отражения на длине волны 1030 нм, более узкой (6.7 нм) спектральной шириной полосы отражения, дисперсией 27 пс/нм, но с большей дифракционной эффективностью – 95%. Процедура растяжения и рекомпрессии исходного 120-фс импульса в системе из двух таких решеток приводила к увеличению его длительности до 486 фс.

### 3. Обсуждение экспериментальных данных и сравнение их с результатами численного моделирования

Средняя мощность излучения на выходе первого усилителя при его работе в одно- и двухпроходном режимах показана на рис.2,а как функция мощности накачки при частоте следования импульсов 1 МГц. Как видно из рисунка, в двухпроходном режиме усиления средняя мощность достигает 3.6 Вт при усилении более 180. Усилитель работал в режиме усиления слабого входного сигнала, что обусловило достаточно низкую оптическую эффективность энергосъема – примерно 5%. Качество пучка было достаточно хорошим, параметр  $M_{x,y}^2 = 1.07 \times 1.16$ , что свидетельствует о малости фазовых искажений. Спектр излучения достаточно сильно (до 2.17 нм) сузился по полувысоте, а длительность сжатого импульса существенно выросла – до 600 фс.

Средняя мощность излучения во втором усилителе при мощности накачки 130 Вт увеличилась лишь до 50 Вт

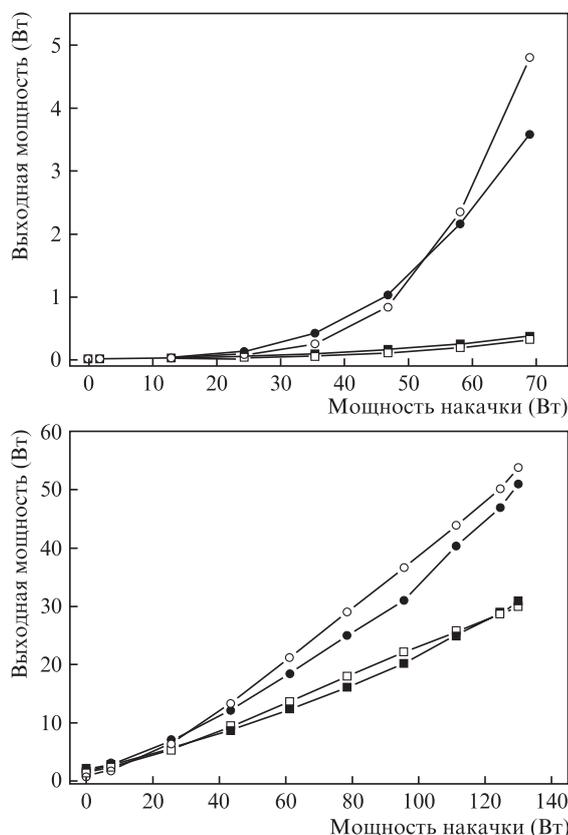


Рис.2. Экспериментально зарегистрированные зависимости выходной мощности первого (а) и второго (б) усилителей от мощности накачки для одного (■) и двух (●) проходов усиливаемого излучения через активный элемент (□ и ○ – результаты моделирования для одного и двух проходов излучения соответственно).

(рис.2,б). Падение общего усиления на втором проходе по сравнению с первым свидетельствует о существенном насыщении усиления вследствие значительного энергосъема, составившего 35.7%. Измеренное качество пучка на выходе второго усилителя ( $M_{x,y}^2 = 1.09 \times 1.23$ ) лишь немного ухудшилось по сравнению с качеством пучка после первого усилителя, что вновь подтверждает малость фазовых искажений. Спектр излучения сузился до 1.82 нм, а длительность импульсов после компрессора увеличилась до 830 фс.

Для численного моделирования параметров усилителей на тонких стержнях и оптимизации экспериментальной схемы мы использовали пакет программ ASLD (Advanced software for laser design) [14]. Для более точного расчета усиления вначале измерялось пропускание излучения накачки через тонкий стержень, по которому был определен коэффициент поглощения накачки. После введения начальных условий, таких как мощность входного излучения, параметры спектра затравочного пучка, геометрия и легирование тонкостержневого кристалла, а также параметров лазерного диода накачки условия усиления оптимизировались путем расчета выходной мощности в соответствии с положениями пучка накачки и затравочного пучка, перетяжки пучка, положения вогнутого зеркала и т. д. Как видно из рис.2, результаты расчета хорошо соответствуют результатам эксперимента.

На рис.3 показан пример предварительной оптимизации экспериментальной конфигурации двухпроходного усилителя с помощью численного моделирования. Результаты расчета выходной мощности излучения в зависимости от положения вогнутого зеркала (рис.3,а) показывают наличие двух максимумов 1 и 2 выходной мощности, обусловленных хорошим пространственным перекрытием близких по размерам пучков накачки и усиливаемого излучения, – соответственно для расходящегося в кристалле и сходящегося пучка. Найденное экспериментально оптимальное положение вогнутого зеркала находилось на расстоянии 280 мм от кристалла, поскольку усиленный пучок сильнее сфокусирован после прохождения через кристалл в случае падения сходящегося к кристаллу пучка. Был найден также оптимальный размер пучка при использовании комбинации линз путем расчета зависимости выходной мощности от размера пучка (рис.3,б).

На рис.4 приведены зависимости мощности на выходе третьего усилителя до и после компрессора от мощности накачки для однопроходного режима усиления. Выходная мощность достигла 130 Вт при мощности накачки 262 Вт. Таким образом, оптическая эффективность составила 30.5%. Качество пучка ухудшилось:  $M_{x,y}^2 = 1.63 \times 1.90$ , что обусловлено влиянием термооптических фазовых искажений.

Энергетическая эффективность компрессии при использовании первой дифракционной решетки составила 76%, что обеспечивало выходную мощность 100 Вт. Спектр излучения сужался до 1.72 нм, а длительность импульсов увеличивалась до 947 фс (рис.5). Произведение ширины спектра на длительность импульса составило 0.46, что значительно превышает значение 0.315, полученное в приближении формы импульса, описываемой функцией  $\text{sech}^2$ , и указывает на присутствие остаточной фазовой модуляции.

Использование другой объемной чирпированной брэгговской дифракционной решетки, обладающей меньшей

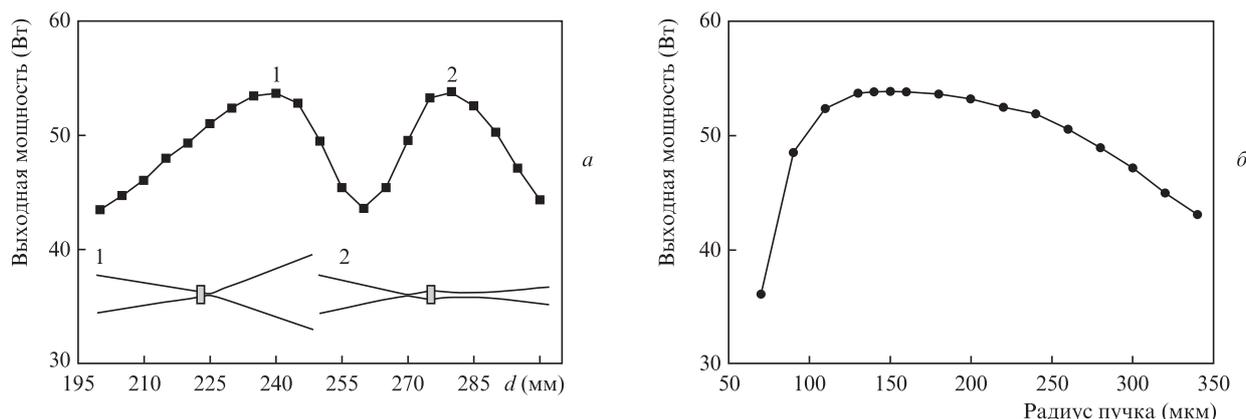


Рис.3. Результаты моделирования для второго двухпроходного усилителя: зависимости выходной мощности от расстояния  $d$  между вогнутым зеркалом и тонким стержнем (а) и выходной мощности от поперечного размера затравочного пучка (б). В нижней части рис.3,а показан ход лучей затравочного пучка в точках максимумов 1 и 2.

шириной полосы отражения (6.7 нм) и большей эффективностью (95% вместо 72.6%) позволило получить на выходе такую же мощность 100 Вт, но при существенно меньшей мощности излучения накачки третьего усилителя – 194 Вт вместо 262 Вт. Это, в свою очередь, привело к улучшению качества пучка,  $M_{x,y}^2 = 1.46 \times 1.50$ , из-за уменьшения термооптических aberrаций при меньшей мощности накачки. Длительность сжатого импульса при использовании данной решетки несколько выросла – до 1.11 пс – из-за меньшей ширины спектральной полосы отражения.

С использованием этих дифракционных решеток были проведены исследования влияния частоты следования импульсов на мощность излучения на выходе после первого и второго усилителей. Соответствующие зависимости выходной мощности от мощности накачки показаны на рис.6. Наблюдается существенный рост выходной мощности при увеличении частоты следования импульсов, что обусловлено большей входной средней мощностью сигнала – 20 мВт при 1 МГц против 5 мВт при 250 кГц. Однако вследствие насыщения усиления это различие на выходе второго усилителя сглаживается. Так, например, общее усиление при частоте следования 1 МГц составило 2800, а при частоте 250 кГц – 8530. При этом энергия импульсов во втором случае достигала 167 мкДж. Качество лазерного пучка для всех трех частот следования было близким:  $M_x^2 = 1.25$ ,  $M_y^2 = 1.20-1.29$ . При уменьшении частоты следования длительность импульса несколько уве-

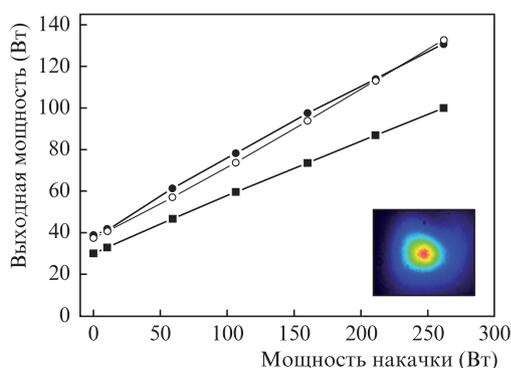


Рис.4. Зависимости мощности на выходе третьего усилителя перед (●) и после компрессора (■) от мощности накачки (○ – результаты моделирования). На вставке – изображение лазерного пучка в ближней зоне.

личивалась – от 951 фс при частоте 1 МГц до 1020 фс при 250 кГц – из-за сужения спектра вследствие увеличения общего усиления.

В ходе экспериментов мы иногда наблюдали разрушения кристалла в третьем усилителе при максимальной выходной мощности и частоте следования импульсов 1 и 0.5 МГц. Энергия импульса в первом случае достигала 130 мкДж при длительности chirпированного импульса примерно 15 пс, а во втором – 252 мкДж при длительности импульса около 50 пс. Пиковая мощность импульсов в обоих случаях приблизительно равна 5 МВт. Отметим, что в работе [15] пробой кристалла Yb:YAG в усилителе наблюдался при примерно такой же пиковой мощности.

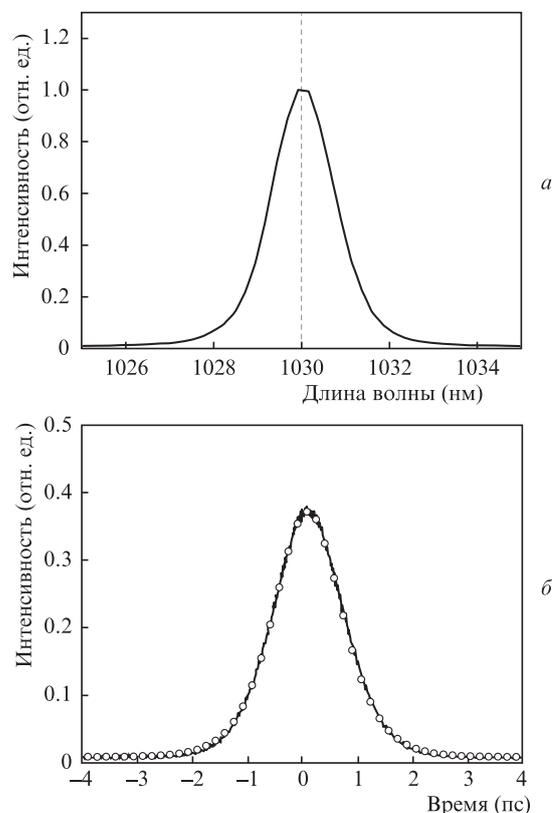


Рис.5. Спектр (а) и автокорреляционная функция (б) фемтосекундных лазерных импульсов при выходной мощности 100 Вт (кружки соответствуют автокорреляционной функции  $\text{sech}^2$ -импульса).

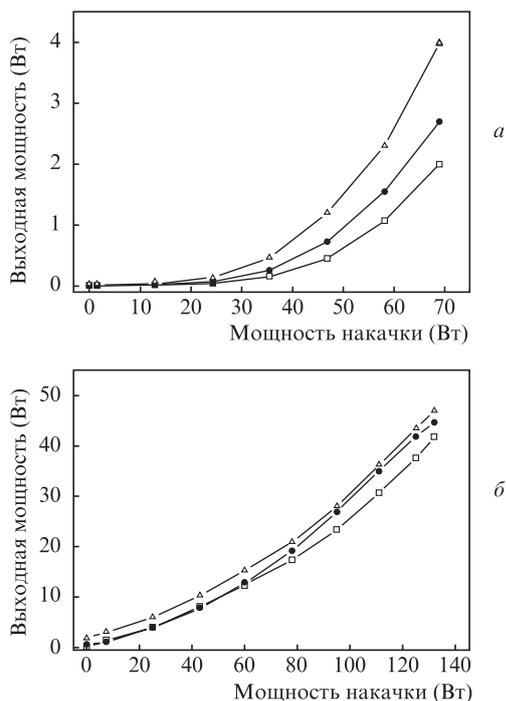


Рис.6. Выходная мощность излучения первого (а) и второго (б) усилителей в зависимости от мощности накачки для частот следования импульсов 250 кГц ( $\triangle$ ), 500 кГц ( $\bullet$ ) и 1 МГц ( $\square$ ).

Простейшая оценка плотности максимальной энергии в пучке дает величину на уровне  $0.1 \text{ Дж/см}^2$ , что существенно ниже порога пробоя кристалла YAG для указанных длительностей импульса [16], причем пиковая мощность, равная 5 МВт, уже превышает критическую мощность самофокусировки на керровской нелинейности в этом кристалле [17, 18]. В условиях такого превышения мощности диаметр пучка в перетяжке может существенно уменьшиться, что приведет к повышению интенсивности излучения. Кроме того, вклад в увеличение интенсивности может давать и тепловая линза [11].

#### 4. Заключение

Представлены результаты разработки фемтосекундной лазерной системы с 100-ваттной средней мощностью на основе трех тонкостержневых Yb:YAG-усилителей чирпированных импульсов. Частота следования импульсов изменялась в пределах  $0.25\text{--}1 \text{ МГц}$  с помощью ячейки Поккельса, выделяющей эти импульсы из непрерывной последовательности импульсов задающего генератора на Yb:KGW. Растяжение и сжатие импульсов осуществлялось в отдельных объемных брэгговских дифракционных решетках с дисперсией от 12 до 27 пс/нм. Общее усиление системы в режиме насыщения составляло 2800–8500 в зависимости от частоты следования импульсов. Выходная мощность излучения до компрессии превысила 130 Вт при оптической эффективности системы 30.5%, что соответствует энергии импульса 170 мкДж при частоте следования 250 кГц на выходе второго усилителя. Из-за ограниченности частотной полосы усиления кристалла Yb:YAG спектр сужался до 1.7 нм. После сжатия импульсов в дифракционной решетке до длительности 947 фс средняя мощность уменьшалась до 100 Вт, что соответствует пи-

ковой мощности импульсов 105 МВт. Использование более эффективной дифракционной решетки позволило получить такую же выходную мощность при меньшем уровне накачки усилителей, что привело к улучшению качества выходного пучка  $M^2$  в 1.1–1.25 раза до значений  $M_x^2 \times M_y^2 = 1.46 \times 1.50$ . Система продемонстрировала хорошую стабильность выходной мощности на уровне среднеквадратичного отклонения от среднего значения 0.8% на протяжении 60 минут работы. При пиковой мощности усиливаемого импульса, превышающей 5 МВт, наблюдался пробой активного элемента в третьем усилителе, связанный, вероятно, с самофокусировкой излучения на керровской нелинейности и на тепловой линзе, создаваемой излучением накачки. Наиболее очевидный метод подавления самофокусировки состоит в уменьшении пиковой мощности чирпированных импульсов путем их удлинения, а минимизировать тепловую линзу можно с помощью оптимизации системы накачки.

Авторы выражают благодарность О.В.Палашову, И.Б.Мухину и И.И.Кузнецову из Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН за предоставление усилительных модулей и С.А.Чижову за помощь в проведении экспериментов.

Работа поддержана Национальным научно-исследовательским Советом науки и технологии, финансируемым MSIP, Корея (проект №20-12-N0101-43).

- Markovic V., Rohrbacher A., Hofmann P., Pallmann W., Pierrot S., Resan B. *Opt. Express*, **23**, 25883 (2015).
- Beirou F., Eckerlel M., Graf T., Abdou Ahmed M. *Appl. Phys. B*, **126**, 148 (2020).
- Янг Ч., Ли Б., Ким Ч.В., Джонг В., Салль Е.Г., Чижов С.А., Хо Д., Яшин В.Е., Ким Г.Х. *Квантовая электроника*, **49**, 1168 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 1168 (2019)].
- Dausinger F., Lichtner F., Lubatschowski H. *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications* (Berlin: Springer, 2004).
- Джонг Б., Ли Б., Ким Ч.Х., Чой Ч.А., Янг Ч., Салль Е.Г., Ким Ч.В., Хо Д., Джанг Д., Ким Г.Х., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **50**, 201 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 201 (2020)].
- Pouysegur J., Delaigue M., Honninger C., Zaouter Y., Georges P., Druon F., Mottay E. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21**, 212 (2015).
- Lee B., Chizhov S.A., Sall E.G., Kim J.W., Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Palashov O.V., Kim G.H., Yashin V.E., Vadimova O.L., *JOSA B*, **35**, 2594 (2018).
- Kim G.H., Yang J., Lee B., Kim J.W., Neo D.C., Чижов С.А., Салль Е.Г., Яшин В.Е. *Оптический журн.*, **85** (11), 29 (2018).
- Kim G.H., Yang J.H., Lee D.S., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А., Kang U., Яшин В.Е. *Оптический журн.*, **80** (3), 22 (2013).
- Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., Ueda K.-I. *Opt. Lett.*, **43**, 3941 (2018).
- Кузнецов И.И., Чижов С.А., Мухин И.Б., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **50**, 327 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 327 (2020)].
- www.fiberocryst.com.
- Reflecting Bragg Gratings (RBG); <https://optigrate.com>.
- ASLD: Laser Simulation Software; <http://www.asldweb.com>.
- Pouysegur J., Weichelt B., Guichard F., Zaouter Y., Honninger C., Mottay E., Druon F., Georges P. *Opt. Express*, **24** (9), 9896 (2016).
- Иванов В.В., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Склизов Г.В. *Квантовая электроника*, **22**, 589 (1995) [*Quantum Electron.*, **25**, 562 (1995)].
- Zelmon D.E., Small D.L., Page R. *Appl. Opt.*, **37**, 4933 (1998).
- Major A., Aitchison J.S., Smith P.W.E., Druon F., Georges P., Viana B., Aka G.P. *Appl. Phys. B*, **80**, 199 (2005).