

# Оптимизация параметров широкополосного параметрического усилителя с многопучковой накачкой

С.А.Фролов, В.И.Трунов, Е.В.Пестряков

*Приведены результаты численного моделирования выходного усилительного каскада мощной лазерной системы на основе параметрического усиления фемтосекундных импульсов в кристалле LBO при многопучковой накачке. Описана методика выбора оптимальной конфигурации усилителя с произвольным количеством пучков накачки для достижения широкой спектральной полосы усиления при минимальных потерях из-за параметрической дифракции. Представлены результаты моделирования процесса параметрического усиления, эффективности усиления, а также пространственного профиля усиленного излучения с учетом интерференции паразитных усиленных пучков. Показана возможность устранения возникающей пространственной модуляции интенсивности усиленного излучения при использовании пространственных фильтров. Установлено, что с увеличением числа пучков накачки длительность усиленного импульса незначительно увеличивается (с 20 до 21 фс) в случае некогерентных пучков накачки и повышается до 25 фс в случае когерентных. При этом эффективность усиления снижается с 23% до 21% в первом случае и до 11% во втором.*

**Ключевые слова:** параметрическое усиление, многопучковая накачка, фемтосекундные импульсы, LBO.

## 1. Введение

Лазерные системы на основе каскадов параметрического усиления являются одними из наиболее перспективных для создания источников фемтосекундного излучения со сверхвысокими интенсивностью и контрастом [1–3]. Использование каскадов параметрического усиления с многопучковой накачкой позволяет снизить требования к энергии импульсов накачки и, следовательно, увеличить частоту следования импульсов в лазерных системах со сверхвысокой пиковой мощностью.

Согласно проведенному нами предварительному анализу [4], для реализации режима широкополосного параметрического усиления при использовании многопучковой накачки с целью увеличения суммарной энергии ее излучения определяющим является выбор углов вхождения пучков накачки в кристалл относительно направления усиливаемого излучения. При этом спектральные кривые усиления, создаваемого каждым пучком, должны быть подобны в области усиления, а точнее, должны быть подобны кривые волновой расстройки. В противном случае в спектральных областях с различной волновой расстройкой вследствие конкуренции холостых волн с разными фазами усиление будет значительно менее эффективно, что в итоге приведет к сужению итогового контура усиления. Таким образом, возможны два эффективных режима многопучковой накачки: с подобными спектрами усиления и с их минимальным пересечением. Это отражено в ряде публикаций, где анализируются два режи-

ма использования многопучковой накачки при параметрическом усилении. Первый режим призван увеличить суммарную энергию излучения накачки [4–10], второй позволяет добиться увеличения спектральной ширины контура усиления [11–14]. Необходимо отметить, что в работах, относящихся к первому режиму, рассматривается только узкополосное усиление. Также важно отметить, что второй режим не дает возможности существенно увеличить суммарную энергию импульсов накачки из-за малой ширины спектрального контура усиления для дополнительных пучков накачки.

К настоящему времени в экспериментах, проведенных в режиме увеличения энергии при усилении наносекундных импульсов, наибольшее число использованных пучков накачки равнялось пяти [6], а в режиме увеличения ширины спектра при усилении импульсов длительностью 5 фс при пикосекундной накачке – двум [13, 14]. Поскольку основной целью настоящей работы является создание методов увеличения энергии импульса длительностью 20 фс на выходе широкополосного параметрического каскада усиления при многопучковой накачке, в дальнейшем ограничимся рассмотрением только этого режима.

Одним из основных механизмов, ограничивающих эффективность применения многопучковой накачки, является параметрическая дифракция, или образование и усиление паразитных пучков на частотах взаимодействующих волн – усиливаемой, холостой и волны накачки. Как показано в [15], с увеличением угла между пучками накачки эффективность параметрической дифракции снижается, что обусловлено ростом волновой расстройки для паразитных волн. В работе [7] проанализировано также образование паразитных волн на новых суммарных и разностных частотах, в первую очередь, это вторые гармоники основных волн. При этом степень когерентности пучков накачки не влияет на эффективность параметрического усиления основной волны, но подавляет усиление паразитных волн [9, 10]. Таким образом, правильный

С.А.Фролов, В.И.Трунов, Е.В.Пестряков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: stanislav.a.frolov@gmail.com, trunov@laser.nsc.ru, pefvic@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 28 октября 2016 г., после доработки – 15 августа 2017 г.

выбор конфигурации системы многопучковой накачки является определяющим для минимизации процессов паразитного усиления при сохранении широкой спектральной полосы усиления и высокого коэффициента преобразования. Важным также является сравнительный анализ эффективностей схемы усиления с многопучковой накачкой и многокаскадной схемы параметрического усиления.

## 2. Оптимизация конфигурации параметрического усилителя с многопучковой накачкой

Нами разработана методика определения оптимального пространственного расположения пучков при многопучковой накачке параметрического каскада усиления. В настоящей работе с ее использованием оптимизированы параметры каскада параметрического усиления на основе кристалла LBO с многопучковой накачкой для создаваемой в ИЛФ СО РАН мультитераваттной двухканальной лазерной системы с когерентным сложением полей.

В рамках развиваемой методики для реализации режима высокоэффективного параметрического усиления фемтосекундных импульсов на первом этапе определяются оптимальные направления распространения пучков при многопучковой накачке (относительно направления распространения усиливаемого импульса). В спектре усиливаемого импульса длительностью 20 фс с центральной длиной волны 830 нм выбирается ряд длин волн для поиска оптимальных углов распространения пучков накачки с центральной длиной волны 532 нм. Это длины волн 775 и 950 нм на краях спектра усиливаемого импульса (соответствующие интенсивности составляют  $\sim 10\%$  от его максимума), а также 800 и 900 нм в средней части спектра импульса с интенсивностями более 80% от максимума. Каждой длине волны  $\lambda_n$  можно сопоставить область углов  $L_n$  с малой амплитудой волновой расстройки. Тогда, очевидно, для широкополосного усиления пучки накачки должны находиться в области

$$M = \bigcup_n L_n,$$

т. е. в области одновременного пересечения всех  $L_n$ . Далее путем максимизации площади  $M$  выбирается угол синхронизма. Такой подход позволяет минимизировать эффективность усиления паразитных пучков ввиду большего углового расстояния между возможными положениями пучков накачки [15].

Выполненный нами анализ показал, что при указанных выше параметрах взаимодействующих волн в кристалле LBO в плоскости  $XY$  ( $\theta = 90^\circ$ ) при синхронизме I типа существуют два оптимальных угла синхронизма  $\varphi$ , равные  $12.8^\circ$  и  $15.25^\circ$ . Далее под чувствительной плоскостью будем понимать плоскость  $XY$ , а под нечувствительной – плоскость  $kZ$ , где  $k$  – волновой вектор усиливаемой волны, лежащий в плоскости  $XY$ . В дальнейшем все углы распространения пучков излучения отсчитываются относительно вектора  $k$ . Области углов с малой волновой расстройкой для каждой спектральной компоненты представлены на рис.1 серым цветом. Области их пересечения более светлые. Одновременное пересечение угловых областей для всех спектральных компонент обозначено белым. Из рис.1 следует, что область пересечения областей с малой волновой расстройкой для всех спектральных

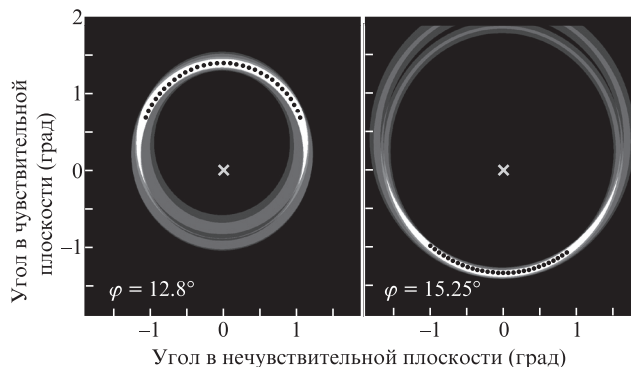


Рис.1. Области волновой расстройки с амплитудой не более  $10 \text{ см}^{-1}$ : крестиками в точках  $(0, 0)$  отмечено положение усиливаемого пучка, черными точками показаны выбранные дискретные наборы возможных положений пучков накачки.

компонент в обоих случаях представляет собой сегмент кольца. При этом для меньшего угла синхронизма радиус кольца меньше, а его толщина больше.

Оптимальная конфигурация многопучковой накачки определяется из условий реализации максимальной волновой расстройки для процесса усиления паразитных компонент. Особенно важно влияние паразитных усиливаемых пучков, возникающих при взаимодействии пучка накачки с холостой волной, образованной другим пучком накачки и основной усиливаемой волной. При корректном выборе расположения пучков накачки суммарная энергия импульсов в таких паразитных пучках из-за значительной волновой расстройки на порядки меньше, чем в пучке основного излучения. Они распространяются в направлениях, отличных от направления распространения основной волны, и вследствие своего большого количества могут отбирать на себя заметную часть энергии пучков накачки. Ниже под волновой расстройкой процесса усиления паразитных волн для некоторого набора пучков накачки будем понимать ее минимальное значение из всех вариантов образования паразитных усиленных волн.

Выбор оптимальных конфигураций накачки проводился путем варьирования возможных положений пучков накачки. Упомянутый ранее сегмент кольца параметризовался выбором в радиальном направлении трех точек с минимальной амплитудой волновой расстройки спектральных компонент. На нем выбирался эквидистантный дискретный набор положений пучков накачки, таким образом, чтобы каждый из них характеризовался примерно одинаковой кривой волновой расстройки, позволяющей реализовать широкополосное усиление. Полученный набор положений представлен на рис.1.

Затем производился расчет минимальной волновой расстройки паразитных процессов усиления для всех возможных пар пучков накачки, после чего для заданного числа пучков накачки выбирались конфигурации накачки с наибольшей расстройкой. Соответствующие результаты представлены в табл.1, а на рис.2 показано угловое положение пучков накачки. Из данных табл.1 следует, что при числе пучков накачки, превышающем 4–5, волновая расстройка паразитного процесса становится достаточно маленькой, и это, как будет показано далее, заметно снижает эффективность усиления основных волн. Полученное оптимальное расположение пучков накачки позволяет выявить шаблон их объединения в группы

Табл.1. Волновая расстройка паразитных процессов для оптимальных конфигураций многопучковой накачки.

Число пучков	Волновая расстройка (см <sup>-1</sup> )	
	$\varphi = 12.8^\circ$	$\varphi = 15.25^\circ$
2	183	217
3	35.4	43.6
4	10.8	16
5	3.9	6.2
6	2.6	2.3
7	1.9	2.1

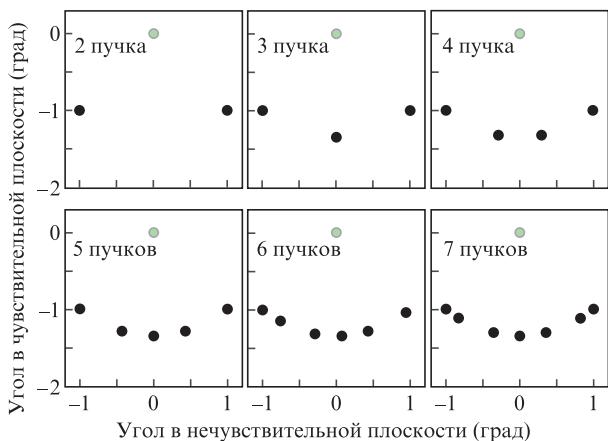


Рис.2. Варианты угловых положений пучков накачки. Серыми кружками в точках (0, 0) отмечены положения усиливаемого пучка.

(рис.2): в оптимальных конфигурациях углы между пучками неодинаковы – существуют области концентрации пучков вблизи плоскости кристалла XY (соответствует углу 0° в нечувствительной плоскости) и вдали от нее, при этом промежуточная область не заполнена.

### 3. Модель параметрического усиления с многопучковой накачкой

Для моделирования широкополосного параметрического усилителя с многопучковой накачкой с учетом эффектов паразитной генерации необходима модель, справедливая и при больших углах распространения излучения накачки, и при широких полосах усиления. Лучше всего для такого моделирования подходит однонаправленное уравнение распространения [16], записанное в фурье-пространстве, единственным приближением которого является предположение о том, что импульс в изотропной среде распространяется в одном направлении, т.е. энергия «отраженного» импульса много меньше энергии усиленного импульса. Предположение об изотропности среды также используется при выводе обычных укороченных уравнений параметрического усиления [17]. Для получения модели, пригодной для реального применения в уравнении (26) из работы [16], мы перешли к представлению поля в виде суммы огибающих поля, как это сделано в [17], в обычном пространстве; нами также учитывалась угловая зависимость показателя преломления кристалла. В итоге система уравнений выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} = ik_{sz} E_s + iF_+[\sigma_s E_i^* E_p],$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial z} = ik_{iz} E_i + iF_+[\sigma_i E_s^* E_p], \tag{1}$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} = ik_{pz} E_p + iF_+[\sigma_p E_i E_s],$$

где  $k_{mz} = \sqrt{k_m^2(\omega, k_x, k_y) - k_x^2 - k_y^2}$  (индекс  $m = s, i, p$  обозначает соответственно усиливаемую (сигнальную) волну, холостую волну и волну накачки;  $k_m(\omega, k_x, k_y)$  – волновой вектор волны  $m$ ; волновой вектор  $k_s$  направлен вдоль оси  $z$ ;  $E_m = E_m(\omega, k_x, k_y, z)$  – напряженность электрического поля волны  $m$  в фурье-пространстве;  $F_+[\dots]$  – прямое преобразование Фурье во времени и в пространстве;  $\omega$  – частота;  $\sigma_m$  – коэффициент нелинейной связи. Поскольку решение уравнения (1) производится в фурье-пространстве, оно позволяет точно учитывать такие линейные эффекты в среде, как дисперсия, дифракция и двулучепреломление.

Особенность использования системы уравнений (1) для моделирования многопучковой накачки заключается в том, что ее решение проводится в угловой области, включающей все взаимодействующие пучки. В отличие от расчетов, представленных нами ранее в работе [4], использование данного подхода позволяет учесть все возможные генерируемые паразитные пучки на частотах всех трех волн – усиливаемой, холостой и накачки.

### 4. Многопучковая накачка параметрических усилителей

Расчитанные с использованием разработанной нами методики наборы угловых положений пучков накачки позволили провести моделирование характеристик выходного каскада параметрического усилителя с многопучковой накачкой для создаваемой в ИЛФ СО РАН мультитераваттной двухканальной лазерной системы с когерентным сложением полей [18] при использовании источников накачки, доступных в настоящее время. Как и ранее [4], мы рассматриваем два варианта реализации предельно допустимой суммарной пиковой интенсивности пучков накачки – при сложении интенсивностей и при сложении полей. Первый вариант возможен, например, при различных центральных длинах волн излучений накачки, поэтому в дальнейшем будем к нему обращаться как к случаю с некогерентными пучками накачки, а второй будем считать вариантом с когерентными пучками. В нашем случае в  $N$  пучках накачки энергия каждого импульса длительностью 90 пс составляла 600 мДж, пространственный профиль пучка накачки принимался гипергауссовым 4-го порядка радиусом  $0.6N$  см при расчете пиковой интенсивности по сложению полей и  $0.6N^{0.5}$  см при расчете по сложению интенсивностей. При этом пиковая интенсивность импульса в каждом пучке накачки бралась равной  $8/N^2$  и  $8/N$  ГВт/см<sup>2</sup> соответственно. Для сравнения эффективностей параметрического усилителя с многопучковой накачкой и традиционной классической многокаскадной системы усиления с количеством каскадов  $N$  выполнены расчеты параметров усиленных импульсов в такой многокаскадной системе. Были рассмотрены две схемы: с промежуточными телескопами для усиливаемого пучка и без них. В схеме с телескопами в первом каскаде использовался один пучок накачки с параметрами, аналогичными многопучковой схеме с  $N = 1$ . Далее при расчетах размер пучков в каждом следующем

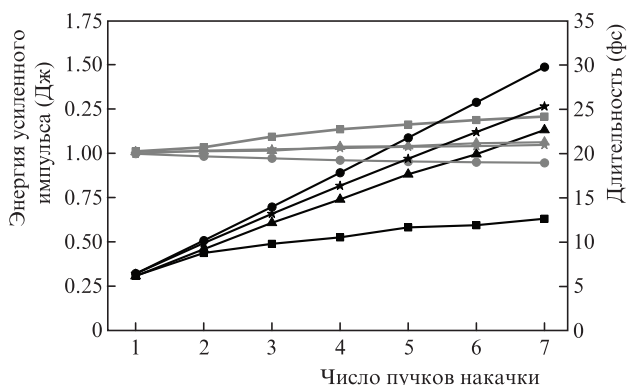


Рис.3. Энергии (черные кривые) и спектрально ограниченные длительности (серые кривые) усиленных импульсов при различном количестве когерентных (квадраты) и некогерентных (треугольники) пучков накачки. Для сравнения приведены результаты моделирования для системы из последовательных кристаллов с телескопами между каскадами (кружки) и без телескопов (звездочки).

каскаде увеличивался так, чтобы суммарная пиковая интенсивность накачки и усиливаемого пучка на входе в каждый кристалл была постоянной. В целом это приводит к увеличению радиуса пучка накачки на последнем каскаде до 1.3 см, при этом для достижения максимального коэффициента усиления длина кристаллов изменяется с 3 до 2.2 мм (7 каскадов). Для получения наиболее широкого контура спектра усиления угол неколлинеарности подбирался на каждом каскаде. Схема без телескопов в целом аналогична схеме с телескопами, но размеры пучков выбирались на первом каскаде такими, чтобы на последнем каскаде не превышалась предельная суммарная интенсивность 14.6 ГВт/см<sup>2</sup>. Длины кристаллов при этом составляли 2.5–5 мм.

Начальная энергия усиливаемого импульса излучения составляла 150 мДж, длительность chirpированного импульса – 40 пс, а его спектр соответствовал длительности 20 фс. Пространственный профиль усиливаемого пучка повторял профиль пучка накачки. Длина кристалла LBO выбиралась такой, чтобы получить максимальный коэффициент усиления.

Рассчитанные значения энергии и спектрально ограниченной длительности усиленного импульса излучения в зависимости от числа пучков накачки представлены на рис.3. Там же приведены соответствующие результаты для системы многокаскадного усиления. Угловые положения пучков накачки, полученные новым методом поиска оптимальных схем многопучковой накачки широкополосного параметрического усилителя, обеспечивают более высокую эффективность усиления с ростом их числа по сравнению с ранее рассмотренными конфигурациями [4]. Для предложенных в настоящей работе конфигураций многопучковой накачки при увеличении числа пучков накачки с одного до семи длительность усиленного импульса в случае некогерентных пучков увеличивалась незначительно (с 20 до 21 фс), а для когерентных пучков она возросла до 25 фс. При этом эффективность усиления (отношение приращения энергии усиленного импульса к энергии излучения накачки) в первом случае снижалась с 23% до 21%, а во втором – до 11%. Оптимальные длины кристалла составляли 3–10 мм для некогерентных пучков накачки и 3–18 мм для когерентных пучков при числе пучков соответственно от одного до семи.

Эффективность многокаскадной схемы усиления в вариантах как с телескопами между каскадами, так и без них, согласно результатам расчетов, представленным на рис.3, несколько больше и по энергии, и по длительности усиленного импульса. Это объясняется тем, что спектр усиления в многокаскадной схеме шире ввиду отсутствия указанных ранее ограничений при выборе угловых положений пучков для многопучковой накачки. При параметрическом усилении фемтосекундных импульсов с большей начальной длительностью эффективности сравниваемых выше схем будут различаться в меньшей степени.

На рис.4 показаны угловые спектры усиленного излучения для различного числа пучков накачки. Видно наличие паразитных пучков, как первичных (от двух изначально ненулевых полей – усиливаемой волны и волны накачки), так и более высокого порядка (от хотя бы одного изначально нулевого поля – холостой волны, либо от других паразитных пучков). Заметно большое различие в числе паразитных пучков при переходе от трех к четырем пучкам накачки. Этим и обусловлен резкий рост энергии паразитного излучения до значительной (более 0.5%–3%), доли энергии усиленного излучения, начиная с четырех пучков. В итоге эта доля не превышает 3%–4% при семипучковой накачке для когерентных пучков и 6%–7% для некогерентных (рис.5). Данная зависимость объясняется как резким уменьшением величины волновой расстройки паразитного усиления с 43.6 до 16 см<sup>-1</sup>, так и ростом (примерно как  $N^2$ ) числа возможных первичных паразитных пучков при увеличении числа пучков накачки  $N$ .

Другим важным вопросом является анализ формирования пространственной структуры усиленного пучка с учетом влияния интерференции пучков накачки. Как было установлено ранее, усиленное излучение будет иметь гладкий пространственный профиль, если при моделировании не учитывать генерацию паразитных пучков [4].

Проведенные нами расчеты при учете усиления паразитных пучков показывают, что интенсивность усиленного излучения оказывается модулированной в пространстве, как видно из рис.6,а. В этом случае при значительном росте доли энергии паразитных пучков с увеличением числа пучков накачки до четырех и более наблюдается также значительный рост глубины модуляции распределения интенсивности в сечении пучка от нескольких процентов при двух-трех пучках до 40%–70% при четырех пучках и более. Это связано с тем, что, несмотря на малую интенсивность излучения в паразитных пучках, их значительное количество приводит к тому, что локально их суммарная интенсивность становится сравнимой с интенсивностью излучения в основном пучке. Данная модуляция может быть устранена применением пространственной фильтрации, позволяющей ограничить угол, в котором распространяется усиливаемое излучение. Уменьшение этого угла, начиная со значения 100 мрад, соответствующего полной расчетной области, приводит к снижению частоты и глубины модуляции с увеличением количества отфильтрованных паразитных пучков вплоть до ее исчезновения при угле 4 мрад, что соответствует области, в которой находится только основной усиленный пучок. На рис.6,б представлен профиль усиленного пучка после пространственной фильтрации, обеспечивающей угол распространения излучения 4 мрад, который исключает наличие паразитных пучков в выходном излучении, и это, как видно из рисунка, приводит к полному устранению модуляции.



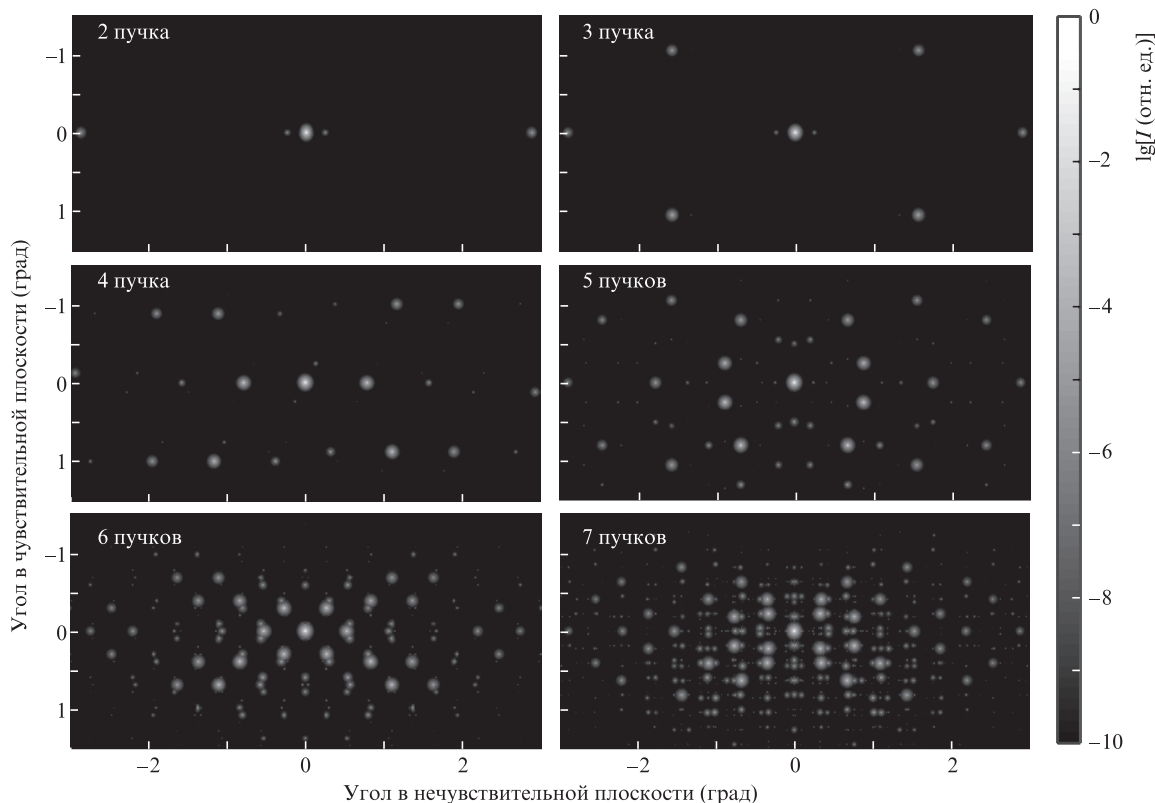


Рис.4. Угловые спектры усиленного излучения при различном числе некогерентных пучков накачки.

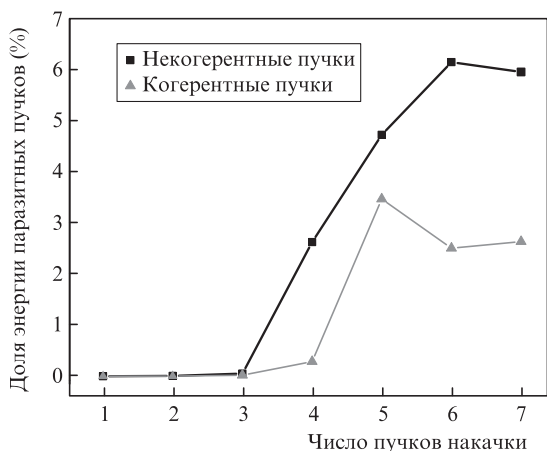


Рис.5. Зависимости доли усиленного паразитного излучения от числа пучков накачки.

### 5. Выводы

Нами разработан метод поиска оптимальных схем многопучковой накачки каскадов широкополосного параметрического усиления на основе нелинейно-оптических кристаллов с учетом влияния генерации паразитных пучков. Показано, что при усилении фемтосекундного излучения с центральной длиной волны 830 нм при многопучковой накачке излучением с длиной волны 532 нм в кристалле LBO в плоскости XY существуют два оптимальных угла для синхронизма I типа, составляющие 12.8° и 15.25°, которые отсчитываются от оси усиливаемого пучка. Оба направления поддерживают широкополосное усиление, но различаются эффективностью паразитных процессов усиления. С использованием разрабо-

танного метода установлен ряд оптимальных схем многопучковой накачки с числом пучков 2–7.

Проведен расчет усиления для указанных схем с целью оценки влияния паразитных процессов усиления на его эффективность и длительность усиленного импульса. Установлено, что с ростом числа пучков накачки длительность усиливаемого импульса (начальная длительность 20 фс) в случае некогерентных пучков накачки увеличивается всего на 5% и возрастает до 25 фс в случае когерентных пучков. При этом эффективность усиления снижается на 10% в первом случае и на 50% во втором.

Численное моделирование показало, что пространственный профиль интенсивности усиленного излучения представляет собой интерференционную структуру, образованную основным усиленным пучком и сопутствующими ему паразитными пучками. Выявлена возможность устранения возникающей пространственной модуляции интенсивности усиленного излучения при использовании пространственных фильтров.

Разработанная методика может быть использована при оптимизации параметрических каскадов усиления на основе нелинейно-оптических кристаллов в различных спектральных областях.

В целом, несмотря на то что эффективность многокаскадной системы параметрического усиления с промежуточными телескопами выше эффективности системы усиления с многопучковой накачкой, последняя обладает рядом преимуществ. Прежде всего, это возможность уменьшения линейных размеров системы, поскольку вместо множества каскадов меньшего размера остается один каскад; кроме того, требуется один нелинейный кристалл вместо их большого количества в многокаскадной системе. Необходимо также отметить, что в многокаскадной системе каждый каскад должен быть оснащен телескопом

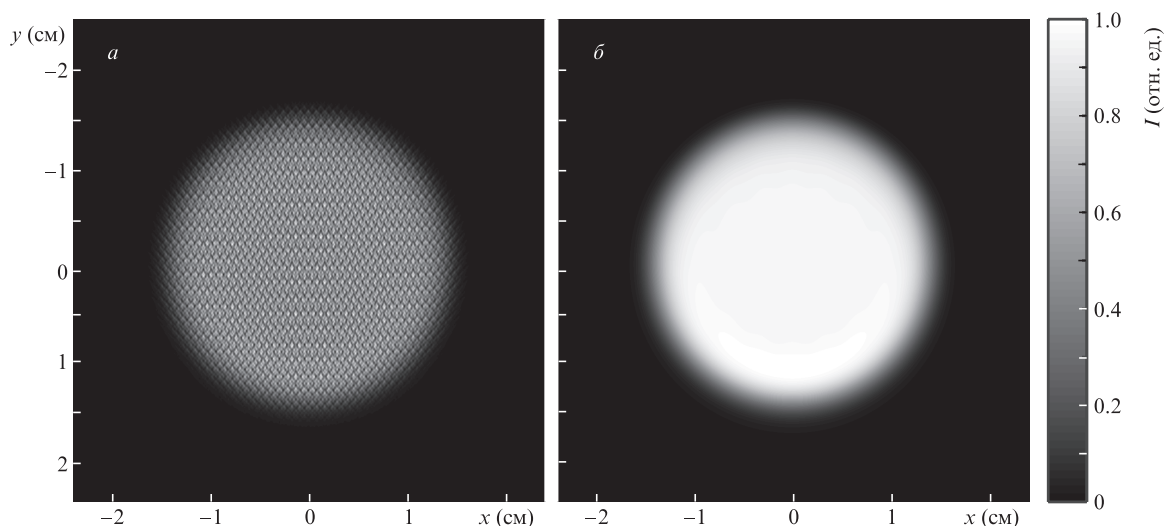


Рис.6. Пространственный профиль пучка усиленного излучения при семипучковой некогерентной накачке до пространственной фильтрации (а) и после нее (б).

не только для излучения накачки, но и для усиливаемого излучения. С другой стороны, система многокаскадного усиления без промежуточных телескопов характеризуется эффективностью, сравнимой с эффективностью многопучковой системы, а кроме того, последняя может быть более компактной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и гранта РФФИ № 15-02-08917.

- Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 421 (2007).
- Xu L., Yu L., Liang X., Chu Y., Hu Z., Ma L., Xu Y., Wang C., Lu Xi., Lu H., Yue Y., Zhao Y., Fan F., Tu H., Leng Y., Li R., Xu Z. *Opt. Lett.*, **38**, 4837 (2013).
- Bagayev S.N., Trunov V.I., Pestryakov E.V., Frolov S.A., Leshchenko V.E., Kokh A.E., Vasiliev V.A. *Laser Phys.*, **24**, 074016 (2014).
- Багаев С.Н., Трунов В.И., Пестряков Е.В., Лещенко В.Е., Фролов С.А., Васильев В.А. *Квантовая электроника*, **44**, 415 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 415 (2014)].
- Dubietis A., Danielius R., Tamošauskas G., Piskarskas A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 1135 (1998).
- Mennerat G., Trophème B., Boulanger B. *Opt. Lett.*, **38**, 3319 (2013).
- Ališauskas S., Butkus R., Pyragaitė V., Smilgevičius V., Stabinis A., Piskarskas A. *Opt. Commun.*, **283**, 469 (2010).
- Pyragaitė V., Butkus R., Archipovaitė G., Kezys D., Stabinis A., Piskarskas A., Smilgevičius V. *Opt. Commun.*, **309**, 344 (2013).
- Tamošauskas G., Dubietis A., Valiulis G., Piskarskas A. *Appl. Phys. B*, **91**, 305 (2008).
- Kurita T., Sueda K., Tsubakimoto K., Miyayama N. *Opt. Express*, **18**, 14541 (2010).
- Terranova F., Kiriya H., Pegoraro F. *Opt. Commun.*, **281**, 4993 (2008).
- Žeromskis E., Dubietis A., Tamošauskas G., Piskarskas A. *Opt. Commun.*, **203**, 435 (2002).
- Herrmann D., Tautz R., Tavella F., Krausz F., Veisz L. *Opt. Express*, **18**, 4170 (2010).
- Herrmann D., Homann C., Tautz R., Scharrer M., Russell P.S.J., Krausz F., Veisz L., Riedle E. *Opt. Express*, **18**, 18752 (2010).
- Kezys D., Pyragaitė V., Stabinis A., Butkus R., Smilgevičius V. *Opt. Commun.*, **324**, 58 (2014).
- Kolesik M., Moloney J.V. *Phys. Rev. E*, **70**, 036604 (2004).
- Bloembergen N. *Nonlinear Optics* (World Scientific, 1996).
- Leshchenko V.E., Trunov V.I., Frolov S.A., Pestryakov E.V., Vasiliev V.A., Kvashnin N.L., Bagayev S.N. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 095301 (2014).