

Когерентное сложение импульсов, усиленных в широкополосных параметрических усилителях с многопучковой накачкой

С.А.Фролов, В.И.Трунов, С.Н.Багаев

Представлены результаты анализа влияния флуктуаций параметров пучков накачки на эффективность когерентного сложения фемтосекундных импульсов, усиленных в параметрических усилителях на основе кристаллов LBO с многопучковой накачкой. Показано, что при переходе от одного пучка накачки к двум происходит резкий скачок чувствительности параметров усиленного излучения к угловой неустойчивости пучков накачки. При дальнейшем увеличении числа пучков накачки чувствительность параметров усиленного излучения к флуктуациям угла распространения пучков накачки меняется слабо. Установлено, что в случае когерентного сложения значительного ($n \gg 1$) числа пучков диаметром 2 см, усиленных в параметрических усилителях с многопучковой накачкой, для достижения его эффективности более 98% необходима угловая стабилизация пучков накачки до уровня менее 50 мкрад. Флуктуации остальных параметров импульсов накачки, таких как энергия, фазовые aberrации и относительный джиттер, влияют либо только на амплитуду усиленного импульса, либо их влияние на фазовый профиль усиленного пучка не превышает 10^{-2} рад, что не должно оказывать заметного воздействия на эффективность когерентного сложения усиленных импульсов.

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

1. Введение

Когерентное сложение мощных фемтосекундных импульсов является одним из перспективных методов достижения ультрарелятивистских интенсивностей [1], а также релятивистских интенсивностей при большой частоте следования импульсов (волоконные многоканальные системы) [2]. При анализе возможных путей достижения ультрарелятивистских интенсивностей в режиме когерентного сложения пучков рассматриваются многоканальные лазерные системы, работающие как в режиме одиночных импульсов (The Extreme Light Infrastructure (ELI) [3], Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS) [4]), так и в частотном режиме [5].

В ИЛФ СО РАН разрабатывается мощная двухканальная лазерная система на основе параметрических каскадов усиления на кристаллах LiB_3O_5 (LBO), на которой экспериментально продемонстрирована возможность высокоэффективного когерентного сложения фемтосекундных импульсов мультитераваттной мощности. В экспериментах использовалась схема активной стабилизации относительного временного джиттера складываемых импульсов [1], что достигается только при работе многоканальных лазерных систем в частотном режиме. Для увеличения энергии усиленных импульсов в отдельном канале этой лазерной системы нами были детально проработаны оптимальные схемы и проанализированы ха-

рактеристики параметрического усилителя с многопучковой накачкой [6, 7] и выходной энергией около 1 Дж.

Представляется интересным исследовать возможность и условия реализации режима высокоэффективного когерентного сложения мощных импульсов после таких параметрических каскадов усиления с многопучковой накачкой.

В статье описана методика моделирования флуктуаций параметров импульсов, усиленных в параметрических каскадах усиления с многопучковой накачкой, а также представлены результаты численного моделирования влияния вышеуказанных флуктуаций усиленных пучков на эффективность их когерентного сложения на параболическом зеркале.

2. Моделирование

Для моделирования широкополосного параметрического усилителя с многопучковой накачкой с учетом эффектов паразитной генерации мы, как и ранее [6, 7], использовали следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_s}{\partial z} &= ik_{sz}E_s + iF_+(\sigma_s E_i^* E_p), \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} &= ik_{iz}E_i + iF_+(\sigma_i E_s^* E_p), \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} &= ik_{pz}E_p + iF_+(\sigma_p E_i E_s), \end{aligned} \quad (1)$$

где $k_{mz} = \sqrt{k_m^2(\omega, k_x, k_y) - k_x^2 - k_y^2}$ ($m = s, i, p$ – усиливаемая холостая волны, а также волна накачки соответственно); $k_m(\omega, k_x, k_y)$ – волновой вектор волны m ; $E_m = E_m(\omega, k_x, k_y, z)$ – напряженность электрического поля волны m в фурье-пространстве по времени и поперечным пространствен-

С.А.Фролов, С.Н.Багаев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: stanislav.a.frolov@gmail.com, bagayev@laser.nsc.ru

В.И.Трунов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: trunov@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 16 февраля 2018 г.

ным координатам; F_+ – прямое преобразование Фурье во времени и в пространстве; ω – частота; σ_m – коэффициент нелинейной связи. Поскольку система уравнений (1) записана в фурье-пространстве, она позволяет точно учитывать линейные эффекты среды, такие 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.

При параметрическом усилении фемтосекундных импульсов с одним пучком накачки влияние флуктуаций ее параметров на эффективность когерентного сложения усиленных импульсов незначительно по сравнению с влиянием флуктуаций параметров усиливаемых импульсов. Это обусловлено переносом фазовых искажений накачки только в холостую волну, что при многопучковой накачке не всегда верно. К наиболее важным факторам, которые могут оказывать влияние на параметры усиленных импульсов, относятся интенсивность пучков накачки, их пространственный фазовый профиль и направление распространения. Другим существенным фактором является требование на угловую ширину пространственного фильтра для усиленного излучения с целью получения гладкого пространственного профиля [6]. Согласно результатам предварительного моделирования параметрических усилителей с четырьмя пучками накачки, единственным существенным фактором, влияющим на эффективность когерентного сложения усиленных импульсов, являются флуктуации направления распространения пучков накачки. Флуктуации остальных параметров импульсов накачки влияют либо только на амплитуду усиленного импульса (интенсивность пучков накачки), либо их влияние на фазовый профиль усиленного импульса не превышает 10^{-2} рад (фазовые аберрации, относительный джиттер). Такой уровень флуктуаций фазового профиля, согласно анализу, проведенному в работе [1], не оказывает заметного воздействия на эффективность когерентного сложения усиленных импульсов.

В дальнейшем в расчетах принималось, что флуктуации направления распространения всех пучков накачки имеют одинаковое нормальное распределение. При этом флуктуации этих пучков независимы. Для рассматриваемой задачи одним из наиболее эффективных методов вычисления параметров усиленного излучения как некоторой функции многомерной случайной величины является моделирование методом Монте-Карло [8]. Для этого необходимо провести розыгрыш распределения начальных флуктуаций, а затем моделирование процесса параметрического усиления при многопучковой накачке. Моделирование процесса мы заменили интерполяцией по сетке с заранее «назначенными» значениями. Это позволило существенно ускорить процесс, но при этом сетка интерполяции должна быть достаточно частой. Флуктуации направления распространения пучков накачки в общем случае происходят в двух измерениях, однако в нашей ситуации их можно разделить на чувствительную и нечувствительную компоненты. Первая направлена в центр дуги, где могут располагаться пучки накачки, а вторая – ортогонально этому направлению [6, 7]. Согласно расчетам, ввиду малости этих флуктуаций влияние нечувствительного направления можно не учитывать.

В работе моделировались конфигурации параметрического усилителя на основе кристалла LBO с числом

пучков накачки от двух до четырех, поскольку при большем их числе моделирование занимало слишком много машинного времени. В нашем анализе случайной величиной являются флуктуации направления распространения пучков накачки в каждом пучке. Например, в случае, когда необходимо вычислить параметры распределения фазы одного усиленного пучка при четырехпучковой накачке, размерность случайной величины равна четырем, а при расчете для когерентного сложения 32 пучков она составляет 128.

Поскольку эффективность когерентного сложения не может быть больше единицы, она плохо описывается нормальным распределением. По этой причине основными вычисляемыми параметрами распределения эффективности когерентного сложения были медиана и граница интервала, в который попадают 95% реализаций.

Параметры лазерной системы для моделирования, как и в работах [6, 7], были выбраны следующими. В каждом из N пучков лазера накачки с центральной длиной волны 532 нм, с энергией каждого импульса 600 мДж и длительностью 90 пс пространственный профиль принимался гипергауссовым 4-го порядка с радиусом $0.6N$ см. При этом пиковая интенсивность каждого пучка накачки бралась равной $8/N^2$, что соответствует, согласно результатам работы [6], варианту параметрического усилителя с использованием когерентных пучков накачки. При моделировании параметров пучка после когерентного сложения на параболическом зеркале использовались уравнения для вычисления распределения электрического поля с учетом векторной теории дифракции [9], а расположение пучков на фокусирующем параболическом зеркале выбиралось таким, чтобы радиус окружности, описанной вокруг пучков, был минимален. При этом диаметр складываемых пучков принимался равным 2 см.

3. Эффективность когерентного сложения параметрически усиленных импульсов при многопучковой накачке

Как отмечалось выше, значительное влияние на эффективность когерентного сложения усиленных импульсов оказывают только флуктуации направления распространения пучков накачки. На рис.1 представлены результаты расчета приобретенного импульсом простран-

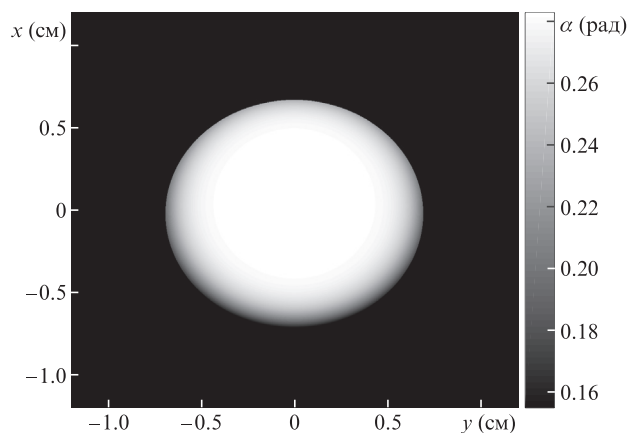


Рис.1. Профиль фазы, приобретенной усиленным пучком при отклонении двух центральных пучков накачки на 1 рад.

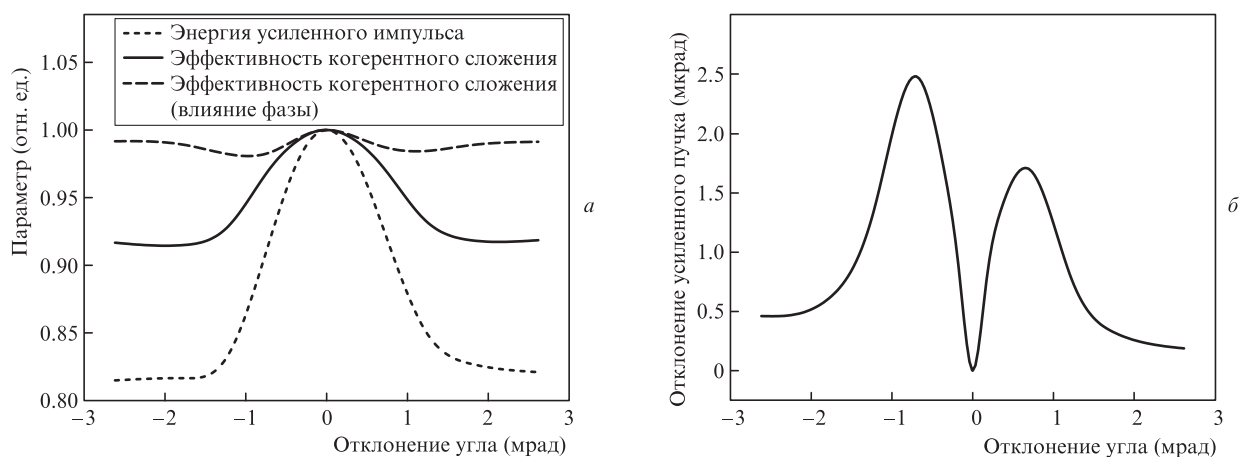


Рис.2. Влияние отклонения угла направления распространения одного из двух центральных пучков накачки на энергию усиленного импульса и эффективность когерентного сложения двух импульсов (а) и на направление усиленного пучка (б).

ственного фазового профиля при усилении в параметрическом усилителе с четырьмя пучками накачки и отклонении одного из двух центральных пучков на 1 мкрад. Как следует из этих данных, пиковая величина фазы достаточно велика и может оказать заметное влияние на эффективность когерентного сложения даже в случае двух складываемых импульсов [1]. На рис.2,а показано влияние углового отклонения одного из пучков накачки на энергию усиленного импульса и эффективность когерентного сложения двух импульсов, а на рис.2,б – на направление распространения усиленного пучка. Важно отметить, что усиленный пучок может достаточно сильно отклоняться от начального направления усиливаемого пучка при отклонении пучков накачки, что не наблюдается при однопучковой накачке.

При дальнейшем моделировании параметров результирующего поля после когерентного сложения усиленных пучков в фокальной плоскости параболического зеркала принималось, что флуктуации направления распространения всех пучков накачки имеют одинаковое нормальное распределение со среднеквадратичным отклонением σ_a . При этом флуктуации разных пучков независимы.

Зависимость квантилей статистического распределения энергии импульсов, усиленных при четырехпучковой накачке, от σ_a показана на рис.3,а. Видно, что для того чтобы с вероятностью 95% энергия усиленного импульса была более 95% от максимальной, среднеквадратичное угловое отклонение пучков накачки не должно превышать 50 мкрад. На рис.3,б представлена зависимость

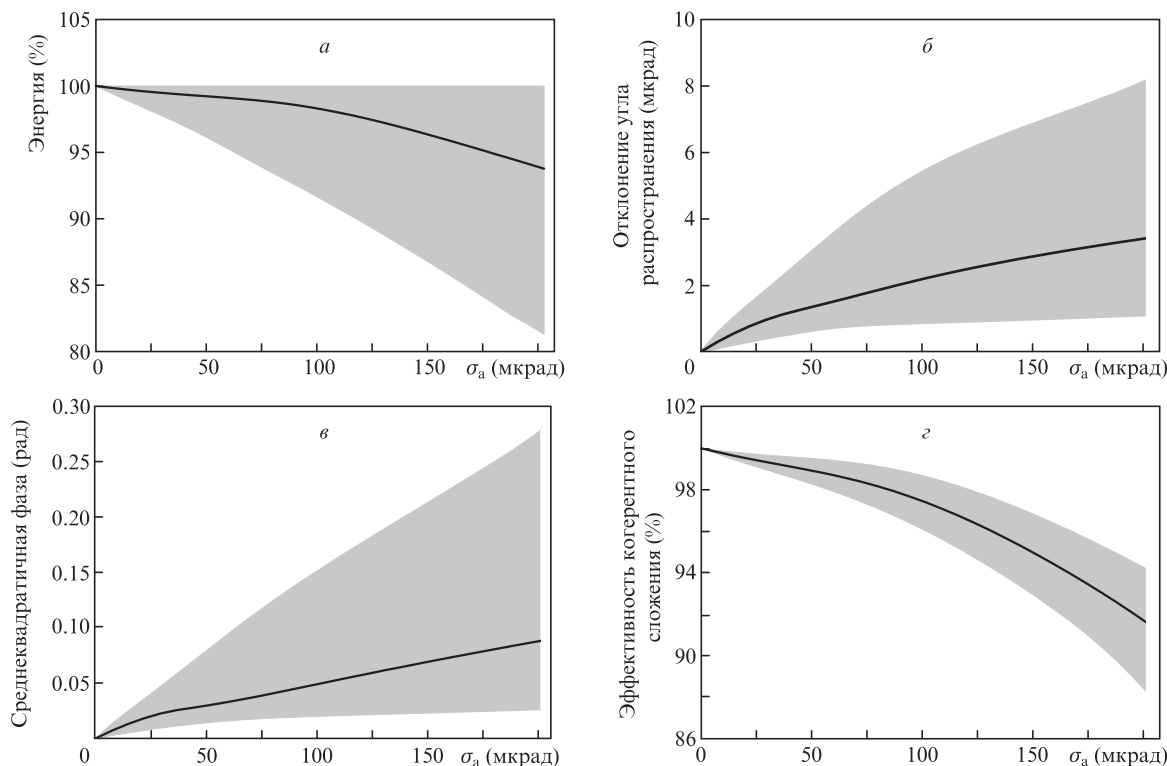


Рис.3. Зависимости статистического распределения: энергии (а), отклонения направления распространения (б), среднеквадратичной фазы усиленного импульса (в) и эффективности когерентного сложения (г) от угловой нестабильности σ_a четырех пучков накачки. Серые области – 95%-ные доверительные интервалы, кривые – медианы.

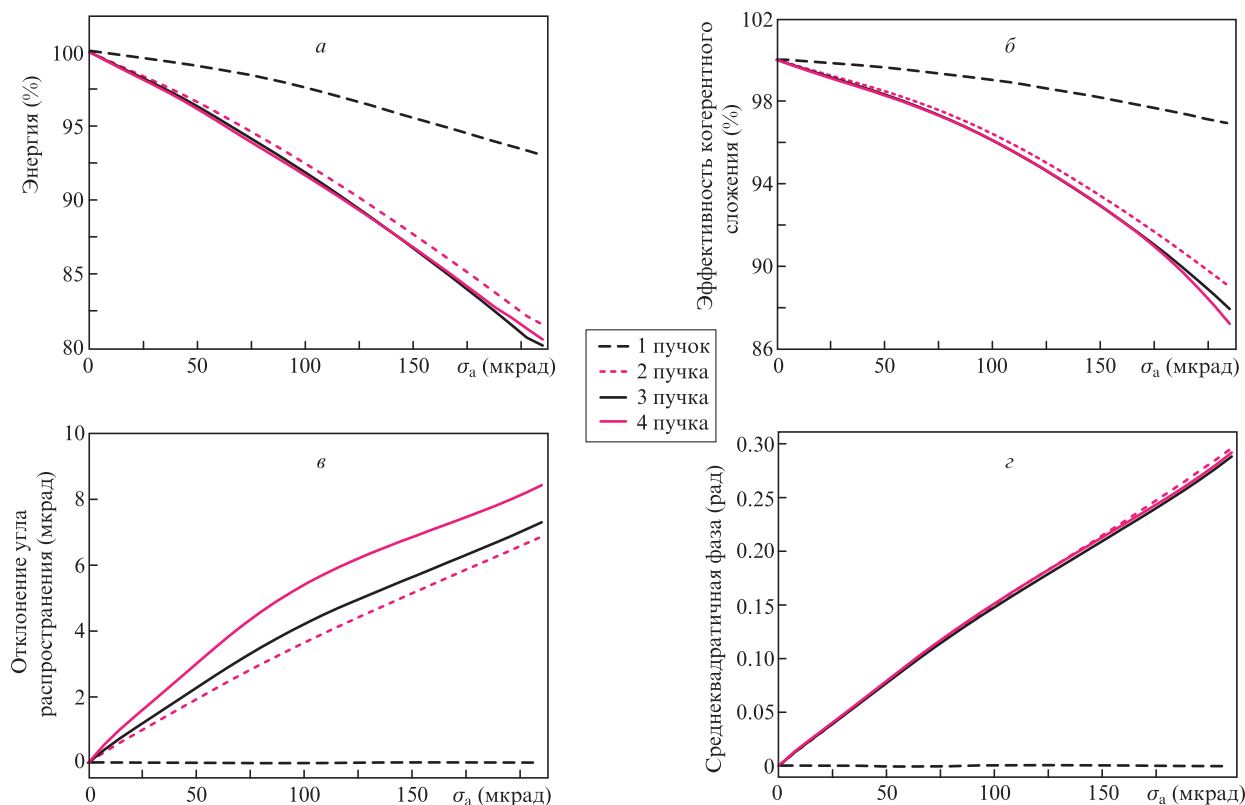


Рис.4. Зависимости нижних границ 95%-ного вероятностного интервала для энергии усиленного импульса (а) и эффективности когерентного сложения 32 пучков (б), а также верхних границ для угла отклонения (в) и среднеквадратичной фазы (г) от угловой нестабильности пучков накачки при их различном числе.

квантилей распределение углового отклонения усиленного импульса, из которого следует, что при флуктуации пучков накачки в пределах 100 мкрад усиленный импульс с вероятностью 95% отклонится на 1–5 мкрад. На рис.3,в приведены результаты моделирования для среднеквадратичной фазы. Видно, что медианное значение фазы мало, однако на верхней границе доверительного интервала оно уже достаточно велико для того, чтобы оказать влияние на эффективность когерентного сложения. Из указанных параметров сложно сделать вывод о влиянии угловых флуктуаций накачки на эффективность когерентного сложения усиленных импульсов, в связи с чем мы провели моделирование именно этой характеристики (рис.3,г). Так, при $\sigma_a = 150$ мкрад (характерная величина флуктуаций нестабилизированных лазеров накачки) эффективность когерентного сложения с вероятностью 95% будет находиться в пределах 93%–97%, а при $\sigma_a = 50$ мкрад она составит 98%–99.5%.

Как показано ниже, интересной особенностью обладает зависимость рассмотренных ранее характеристик от числа пучков накачки. На рис.4 показаны зависимости нижних границ 95%-ного вероятностного интервала для энергии усиленного импульса и эффективности когерентного сложения 32 пучков, а также верхних границ для угла отклонения и среднеквадратичной фазы. Наиболее интересным является случай резкого перехода от одного пучка к двум. В случае одного пучка накачки энергия усиленного импульса с ростом σ_a снижается гораздо слабее, отклонения угла и фазы усиленного пучка практически равны нулю, как и падение эффективности когерентного сложения, обусловленное только снижением энергии

складываемых импульсов. При этом также отметим, что с ростом числа пучков накачки распределения рассмотренных характеристик практически не меняются. Это объясняется конкуренцией холостых волн при различных волновых расстройках для каждого пучка накачки и реализуется при угловой нестабильности. В результате этой же конкуренции ограничивается эффективность усиления при многопучковой накачке [6].

Кроме того, важно рассмотреть зависимость эффективности когерентного сложения от числа складываемых пучков. На рис.5 представлена эффективность когерентного сложения при одном и четырех пучках накачки и числе когерентно складываемых пучков $N = 2, 8$ и 32. С увеличением этого числа доверительный интервал, в который попадают 95% реализаций, существенно сужается, что является следствием центральной предельной теоремы (ЦПТ). Согласно ЦПТ, средняя величина для последовательности из n ($n \rightarrow \infty$) независимых, одинаково распределенных случайных величин со средним значением μ и конечной дисперсией σ^2 , имеющих конечное математическое ожидание и дисперсию, будет иметь нормальное распределение с математическим ожиданием μ и стандартным отклонением $\sigma/n^{0.5}$. Так, например, при среднеквадратичном угловом отклонении пучков накачки 50 мкрад и четырех пучках накачки ширина доверительного интервала эффективности когерентного сложения при двух складываемых пучках составляет около 3%, при восьми пучках – 1.4%, а при 32 пучках – 0.66%. Это дает отношение 4.5:2.1:1, тогда как согласно ЦПТ оно должно приблизительно соответствовать обратному отношению корня из количества складываемых пучков, равному 4:2:1.

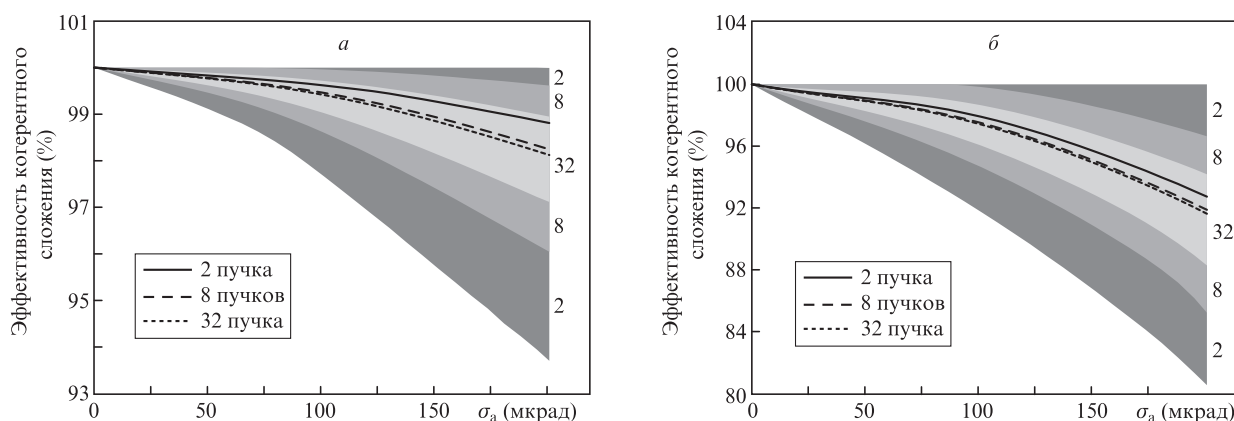


Рис.5. Зависимости распределения эффективности когерентного сложения (медиана, сплошные, штриховые и пунктирные кривые, и границы 95%-ного доверительного интервала, серые области, указаны цифрами для различных N) при одном (а) и четырех (б) пучках накачки от нестабильности пучков накачки.

4. Выводы

Таким образом, установлено, что на эффективность когерентного сложения фемтосекундных импульсов, усиленных в параметрических усилителях с многопучковой накачкой, помимо ранее рассмотренных факторов заметное влияние оказывает только угловая нестабильность пучков накачки. Показано, что при переходе от одного пучка накачки к двум происходит резкий скачок чувствительности параметров усиленного излучения к угловой нестабильности пучков накачки. Так, при многопучковой накачке ее угловая нестабильность начинает оказывать существенное воздействие на угловые и фазовые характеристики усиленного излучения. При этом дальнейшее увеличение числа пучков накачки практически не меняет чувствительности параметров усиленного излучения к флуктуациям угла распространения пучков накачки. Показано, что в случае когерентного сложения значительного числа пучков ($n \gg 1$) диаметром 2 см, усиленных в параметрических усилителях с многопучковой накачкой, для достижения эффективности сложения более

98% необходима угловая стабилизация пучков накачки до уровня менее 50 мкрад.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» и гранта РФФИ № 15-02-08917.

1. 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).
2. Mourou G., Brocklesby B., Tajima T., Limpert J. *Nature Photon.*, **7**, 258 (2013).
3. <https://eli-laser.eu>.
4. <http://www.xcels.iapras.ru>.
5. Bagayev S.N., Trunov V.I., Pestryakov E.V., Frolov S.A., Leschenko V.E., Kirpichnikov A.V., Kokh A.E., Petrov V.V., Vasiliev V.A. *AIP Conf. Proc.*, **1465**, 18 (2012).
6. Фролов С.А., Трунов В.И., Пестряков Е.В. *Квантовая электроника*, **47**, 986 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 986 (2017)].
7. Frolov S.A., Trunov V.I. *Appl. Opt.*, **56**, 6375 (2017).
8. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. *Статистическое моделирование* (М.: Физматлит, 1982).
9. Bahk S.W., Rousseau P., Planchon T.A., Chvykov V., Kalintchenko G., Maksimchuk A., Mourou G.A., Yanovsky V. *Appl. Phys. B*, **80**, 823 (2005).