

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ ЧИРПИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И. Н. Воронич, Б. Г. Зималин, А. И. Кедров, Д. В. Маслов, С. В. Мочкаев, В. В. Романов,
Н. Н. Рукавишников, А. В. Савкин, С. А. Сухарев, О. В. Триканова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В современной лазерной физике существуют два основных принципа построения сверхмощных лазерных систем с ультракороткой длительностью импульса излучения: традиционная схема прямого усиления чирпированного лазерного импульса [1–3] и схема на основе параметрических усилителей (см. рис. 1) [4, 5]. К преимуществам схемы параметрического усиления, по сравнению с традиционной, можно отнести большую спектральную ширину полосы усиления, что позволяет получить меньшую длительность скомпрессированного импульса и достичь петаваттного уровня мощности при меньшем значении выходной энергии, а также более высокое значение контраста сверхкороткого импульса на мишени.

Исследования показали, что в качестве нелинейных элементов для параметрических усилителей можно выбрать кристаллы дигидрофосфата калия (DKDP) [6]. Обуславливается это тем, что при выполнении условий сверхширокополосного синхронизма максимальная ширина полосы усиления сигнала в кристалле DKDP при интенсивности излучения накачки $I_{\text{нак.}} \sim (1-4) \text{ ГВт/см}^2$ составляет величину $(2300-2500) \text{ см}^{-1}$ ($\lambda_0 \approx 910 \text{ нм}$, $\Delta\lambda \approx 200 \text{ нм}$), что позволяет усиливать импульсы длительностью $\approx 15 \text{ фс}$. При этом накачка параметрических усилителей может производиться излучением лазера на неодимовом стекле, преобразованным во вторую гармонику ($\lambda_{1\omega} = 1054 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{нак.}} = \lambda_{2\omega} = 527 \text{ нм}$)[5].

При параметрическом усилении света входной сигнал на частоте $\nu_{\text{сиг.}}$ подается на нелинейный кристалл вместе с интенсивной волной накачки $\nu_{\text{нак.}}$, причем $\nu_{\text{нак.}} > \nu_{\text{сиг.}}$ [4].

Усиление сигнальной волны происходит за счет ее нелинейного взаимодействия с волной накачки (энергия волны накачки перекачивается в энергию сигнальной и, так называемой, холостой волны). Перекачка энергии происходит с соблюдением законов сохранения энергии и импульса:

$$\hbar\omega_{\text{нак.}} = \hbar\omega_{\text{сиг.}} + \hbar\omega_{\text{хол.}}, \quad \hbar\mathbf{k}_{\text{нак.}} = \hbar\mathbf{k}_{\text{сиг.}} + \hbar\mathbf{k}_{\text{хол.}},$$

где $\mathbf{k}_{\text{нак.}}$, $\mathbf{k}_{\text{сиг.}}$, $\mathbf{k}_{\text{хол.}}$ – волновые вектора волны накачки, сигнальной (усиливаемой) волны и холостой волны.

Таким образом, процесс параметрического усиления является трехволновым. Из закона сохранения энергии и импульса следует, что усиление входной сигнальной волны с частотой $\omega_{\text{сиг.}}$ сопровождается генерацией «холостой» волны на частоте $\omega_{\text{хол.}} = \omega_{\text{нак.}} - \omega_{\text{сиг.}}$. То есть исчезает один фотон накачки и генерируются фотоны сигнальной и «холостой» волн.

В работах [6] показано, что при накачке нелинейных кристаллов дигидрофосфата калия (DKDP) излучением второй гармоники неодимового лазера ($\lambda_{\text{нак.}} = 527 \text{ нм}$) условие сверхширокого синхронизма выполняется для $\lambda_{\text{сигн.}} \approx 910 \text{ нм}$. Длина волны холостого излучения при этом $\lambda_{\text{хол.}} \approx 1250 \text{ нм}$.

Исходя из закона сохранения энергии можем определить предельный КПД параметрического усиления, когда вся энергия волны накачки перекачивается в энергию сигнальной и холостой волн:

$$\eta = \frac{\hbar\omega_{\text{сиг.}}}{\hbar\omega_{\text{нак.}}} = \frac{\lambda_{\text{нак.}}}{\lambda_{\text{сигн.}}}. \text{ Предельный КПД параметрического}$$

усиления, при $\lambda_{\text{сигн.}} = 911 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{нак.}} = 527 \text{ нм}$, составит $\eta_{\text{пред.}} = 57,8 \%$.

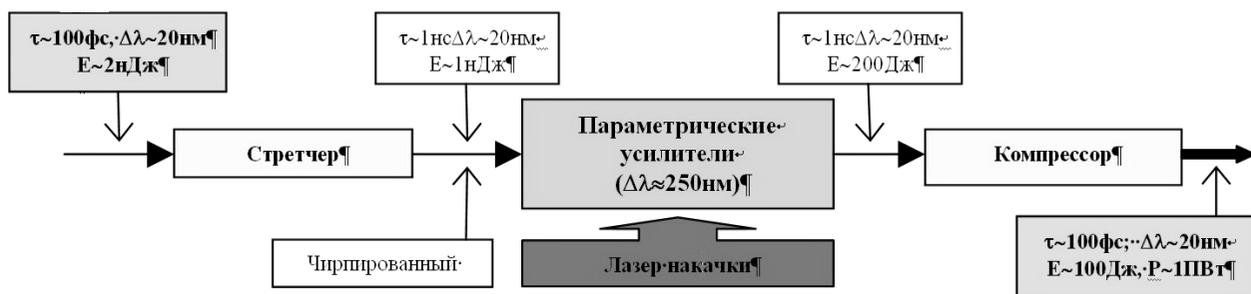


Рис. 1. Принцип построения систем на основе параметрического усиления

В случае точного фазового синхронизма, в приближении взаимодействия плоских волн, параметрическое усиление описывается следующими уравнениями [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial z} = \gamma A_2 A_3; \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} = \gamma A_1 A_3; \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} = -\gamma A_1 A_2. \end{cases}$$

Здесь A_1, A_2, A_3 – амплитуды сигнальной, холостой волны и накачки, z – длина кристалла; γ – коэффициент усиления, $\gamma = d_{eff} \sqrt{2 \frac{\omega_s \omega_i I_p}{\epsilon_0 n_s n_p n_i c^3}}$ где I_p – интенсивность излучения накачки, d_{eff} – коэффициент нелинейности, ω_s – частота сигнальной волны, ω_i – частота холостой волны, n_s, n_p, n_i – коэффициенты преломления нелинейного кристалла, c – скорость света.

Для лучшего понимания процесса параметрического усиления света, в приближении плоских волн, с помощью компьютерной модели, основанной на системе дифференциальных уравнений, а так же в приближении слабого сигнала (для проверки) был выполнен расчет интенсивности усиленной сигнальной волны с $\lambda_{сигн.} = 911$ нм, интенсивности холостой волны с $\lambda_{хол.} = 1250$ нм и интенсивности волны накачки с $\lambda_{нак.} = 527$ нм. Входными параметрами являлись: интенсивность волны накачки $I_{нак.} = 1$ ГВт/см², интенсивность входной сигнальной волны $I_{вх. сигн} = 0,01$ ГВт/см², длина кристалла ($t_{кр.}$) от 0 до 7 см. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Принцип параметрического усиления широкополосных chirпированных лазерных импульсов в нелинейных кристаллах DKDP был реализован совместно с Институтом Прикладной Физики РАН (ИПФ РАН) при создании петаваттного канала действующей в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установки «Луч» [7, 8], на которой и выполнялась экспериментальная часть работы.

Структурная схема лазерной части установки приведена на рис. 3.

Лазерная часть установки состоит из следующих основных систем:

• Стартовой системы, в которой происходит генерация ультракороткого ($\tau \sim 50$ фс) лазерного импульса, растяжение его до длительности $\tau \approx 1$ нс и усиление в предварительных каскадах параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2. Импульс излучения с выхода стартовой системы с энергией $E_{вых.} \approx (50-100)$ мДж и частотой следования 2 Гц может быть скомпрессирован, после чего, мощность его составит $P_{вых., 1} \approx 0,5$ ТВт. В штатном режиме работы он подается на вход следующей, 100-тераваттной системы.

• 100-тераваттной системы, обеспечивающей параметрическое усиление импульса с выхода стартовой системы до энергии $E_{вых., 2} \approx (10-15)$ Дж, что после компрессии дает выходную мощность лазерного пучка $P_{вых., 2} \approx (100-200)$ ТВт.

• Петаваттной системы, обеспечивающей параметрическое усиление chirпированного импульса с выхода предыдущей системы до энергии $E_{вых., 3} \approx 100$ Дж, что после компрессии дает выходную мощность лазерного пучка $P_{вых., 3} \approx (1-2)$ ПВт.

Задающий генератор фемтосекундных лазерных импульсов (ЗГ-фс) на $\text{Cr} : \text{Fg}$ работает по принципу пассивной синхронизации мод резонатора за счет образования в активном элементе наведенной керровской линзы [3]. На выходе ЗГ-фс импульс излучения является спектрально ограниченным ($\lambda = 1250$ нм, $\Delta\lambda \approx 60$ нм, $\tau \approx 40$ фс). С выхода ЗГ-фс импульс поступает на вход стретчера, в котором происходит удлинение импульса до $\tau_{0,5} \approx 0,5$ нс и «упорядочение» его спектра.

Лазерный импульс с выхода стретчера подается на вход системы предварительного параметрического усиления. Источником накачки предварительных каскадов параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2 является лазерная система на $\text{YLF} : \text{Nd}$ с преобразованием длины волны излучения во вторую гармонику ($\lambda_{2\omega} = 527$ нм, $E_{2\omega} \approx 1$ Дж, $\tau_{имп.} \approx 1,5$ нс), работающая в частотном режиме (2 Гц) [10, 11].

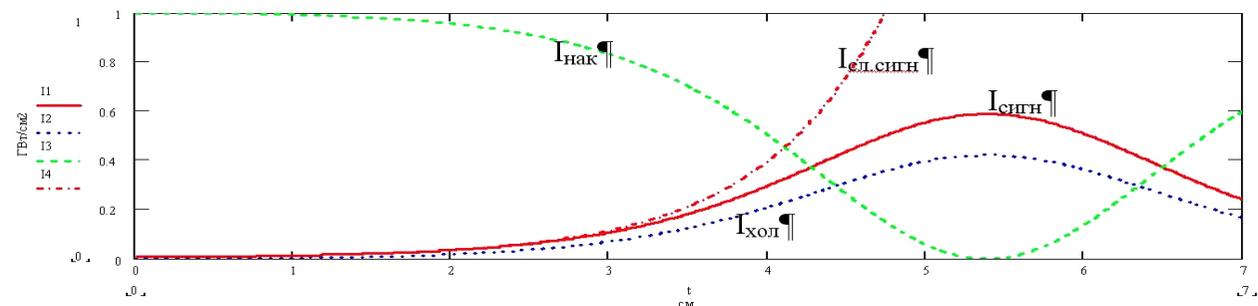


Рис. 2. Зависимости интенсивностей сигнальной волны ($I_{сигн.}$), холостой волны ($I_{хол.}$) и волны накачки ($I_{нак.}$) от длины кристалла DKDP при $I_{вх. сигн.} = 0,01$ ГВт/см² кривая $I_{сл. сигн.}$ – интенсивность сигнальной волны в приближении слабого сигнала

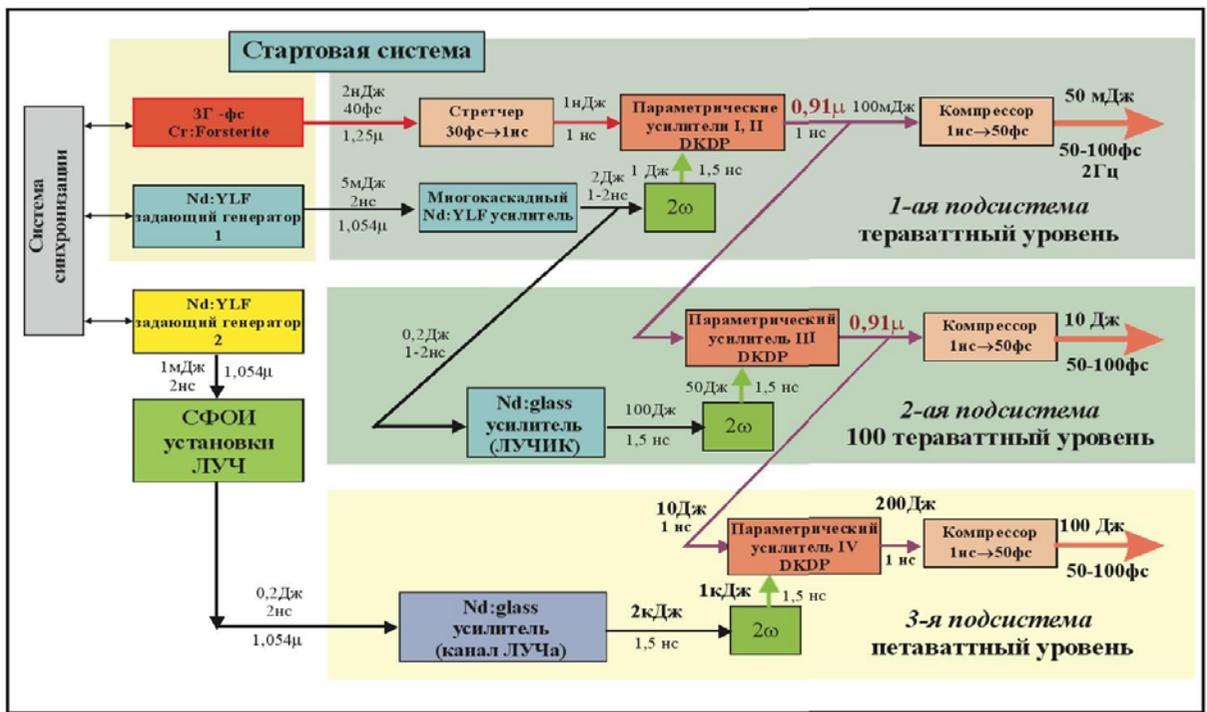


Рис. 3. Принцип построения систем на основе параметрического усиления [9]

Нелинейные элементы ПАУ-1 и ПАУ-2 изготовлены из кристаллов DKDP и имеют длину 70 мм, апертуру 36×30 мм, степень дейтерирования 88,7%. Первый параметрический усилитель ПАУ-1 работает в двухпроходном режиме. На выходе ПАУ-2 энергия достигала $\approx 80\text{--}90$ мДж при $E_{\text{нак.}} \approx 0,8$ Дж. Полный коэффициент усиления $\sim 10^8$. Фото ПАУ-1 приведено на рис. 4.

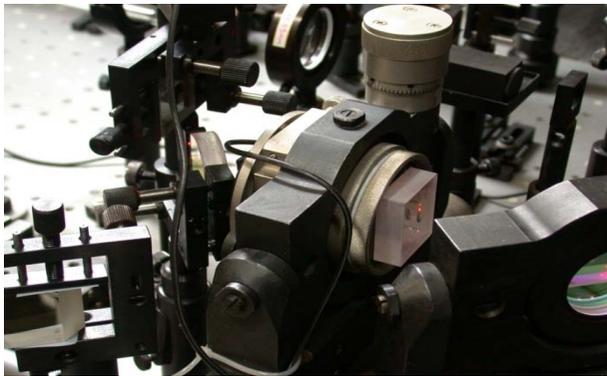


Рис. 4. Выходной параметрический усилитель ПАУ-1

Источником накачки широкоапертурного ($\varnothing_{\text{св}} = 100$ мм) силового каскада параметрического усиления ПАУ-3 является лазер на неодимовом фосфатном стекле с выходной энергией $E_{1\omega} \approx 120$ Дж при длительности импульса $\tau_{0,5} \approx 1$ нс, излучение которого также преобразуется во вторую гармонику ($E_{2\omega} \approx 60$ Дж). Входным сигналом для этого лазера является часть излучения лазера накачки параметрических усилителей стартовой системы с энергией $E_{\text{вх.}} \approx (0,1\text{--}0,2)$ Дж.

Силовой каскад параметрического усиления ПАУ-3 изготовлен из кристалла DKDP со степенью дейтерирования 87%, диаметром световой апертуры 100 мм. Толщина кристалла 65 мм. При энергии накачки $E_{2\omega} \approx 70$ Дж была получена энергия параметрически усиленного импульса $E_{\text{чирп.}} \approx 16$ Дж. Максимальный физический КПД (эффективность) параметрического усилителя, определяемый как $\eta = E_{\text{вх. сигн.}}/E_{\text{вх. } 2\omega}$ составил 27% по энергии. Спектральный состав излучения соответствовал длительности импульса 50 фс. После компрессии длительность лазерного импульса составила $\tau \approx 45$ фс при энергии $E_{\text{вх.}} \approx 9$ Дж, мощность лазерного излучения составила $P_{\text{вх.}} \approx 200$ ТВт.

Для накачки выходного параметрического усилителя ПАУ-4 световым диаметром 200 мм используется преобразованный во вторую гармонику импульс излучения с энергией $E_{2\omega} \approx (0,8\text{--}1)$ кДж, при длительности импульса $\tau_{0,5} \approx 3$ нс с выхода лазерного канала установки «Луч».

Выходной параметрический усилитель ПАУ-4 предназначен для получения chirпированного импульса с энергией $E_{\text{чирп.}} \approx (100\text{--}200)$ Дж, что после компрессии обеспечит мощность лазерного излучения на выходе установки $P_{\text{вх.}} \sim 1$ ПВт ($E_{\text{вх.}} \approx 50\text{--}100$ Дж, $\tau_{\text{имп.}} \approx 50\text{--}100$ фс). Фото ПАУ-4 приведено на рис. 5.

Входным сигналом ПАУ-4 является выходной пучок силового параметрического усилителя ПАУ-3 ($\lambda_{\text{сигн.}} = 911$ нм) с энергией $E_{\text{вх.}} \approx (1\text{--}5)$ Дж.

Специально разработанная система синхронизации прихода лазерных импульсов накачки и сигнала обеспечивала временную точность их совмещения на входе в ПАУ-1, ПАУ-2 и ПАУ-3 не хуже $\Delta t \approx 200$ пс, а на входе в ПАУ-4 в диапазоне $\Delta t \approx (0,05\text{--}1,5)$ нс.

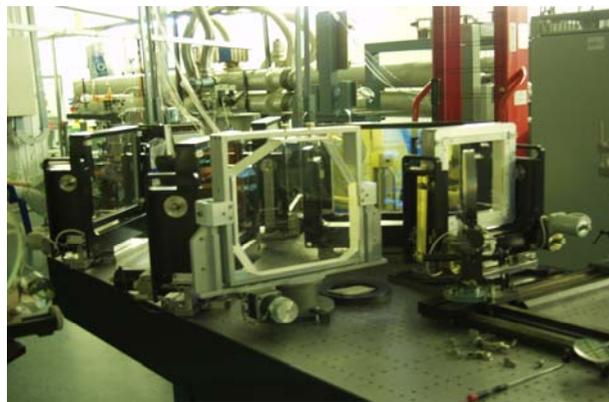


Рис. 5. Выходной параметрический усилитель ПАУ-4

На стартовой части установки, в каскадах предварительного параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2, был проведен ряд экспериментов. Экспериментальная и расчетная зависимость энергии параметрически усиленных сигнальных импульсов от энергии импульсов накачки при неточности синхронизации $\Delta t = 0, 100, 200, 300$ пс представлены на рис. 6.

Измерение временной рассинхронизации чирп-импульса и импульса накачки производились с помощью осциллограмм сигнального импульса и импульса накачки, представленных на рис. 7, 8.

Экспериментальная и расчетная зависимость энергии параметрически усиленных сигнальных импульсов

в выходном каскаде параметрического усиления от энергии импульсов накачки представлены на рис. 9, 10.

Экспериментальные и расчетные временные формы чирпированных импульсов, усиленные в выходном каскаде параметрического усиления ПАУ-4, представлены на рис. 11, 13 и 12, 14 соответственно.

С помощью компьютерной модели можно с приемлемой точностью рассчитать энергию параметрически усиленного лазерного импульса. Так на рис. 15 представлены расчетные зависимости выходной энергии ПАУ-4 от входной при различных энергиях накачки, где $\tau_{0,5 \text{ накл.}} = 3$ нс, $\tau_{0,5 \text{ сигн.}} = 0,5$ нс, $L_{\text{кр.}} = 5,5$ см.

На рис. 16 представлена расчетная зависимость энергии на выходе из ПАУ-4 при рассинхронизации импульсов от 0 до 1000 пс, при накачке 1600 Дж и входном сигнале 2 Дж.

Для понимания влияния неоднородности распределения энергии в ближней зоне сигнального пучка и пучка накачки на входе в ПАУ-4 на неоднородность сигнальной волны на выходе ПАУ-4 проведено две серии расчетов. В первой серии задавалась неоднородность распределения энергии в ближней зоне сигнального пучка при однородной в пучке накачки. Полученные результаты приведены на рис. 17. Иная картина наблюдается при изучении влияния неоднородности распределения энергии в ближней зоне пучка накачки на неоднородность распределения энергии в ближней зоне усиленного сигнального пучка (вторая серия расчетов) – рис. 18.

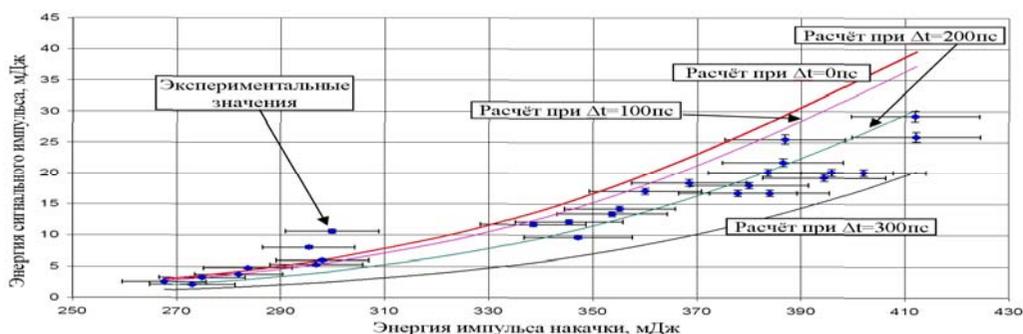


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимость энергии параметрически усиленных сигнальных импульсов в каскадах предварительного параметрического усиления от энергии импульсов накачки при неточности синхронизации $\Delta t = 0, 100, 200, 300$ пс, где точки – экспериментальные значения, сплошные линии – расчетные

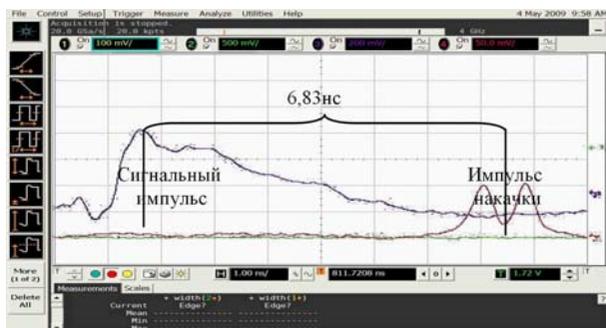


Рис. 7. Осциллограмма сигнального импульса и импульса накачки (2ω). Считаем данную синхронизацию импульсов по времени точной



Рис. 8. Осциллограмма сигнального импульса и импульса 3Г YLF:Nd (1ω) в том же опыте

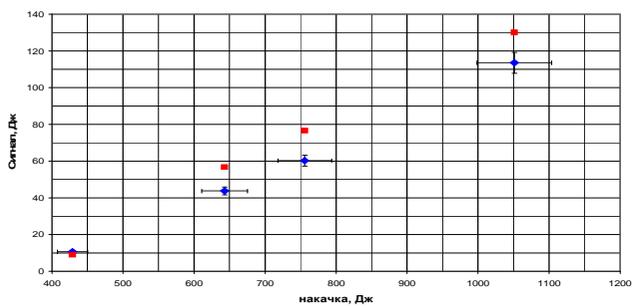


Рис. 9.

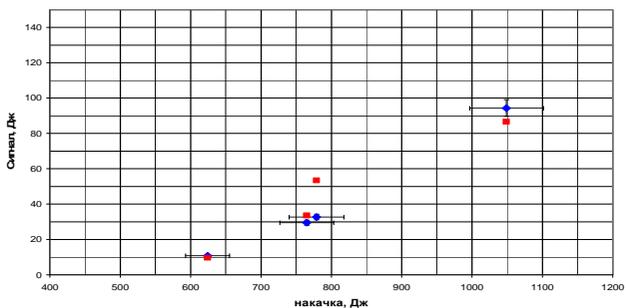


Рис. 10.

Экспериментальная и расчетная зависимость чирп-импульса на выходе из ПАУ-4 от накачки, при $\Delta t \approx (0-1)$ нс (рис. 9) и $\Delta t \approx 1,3$ нс (рис. 10), относительные погрешности при измерении энергии составляют 5%: ромбы – экспериментальные точки, квадраты – расчетные

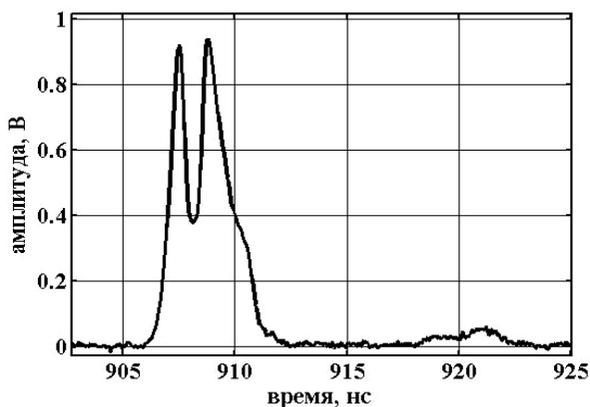


Рис. 11. Экспериментальный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ($\Delta t \approx 0$ нс)

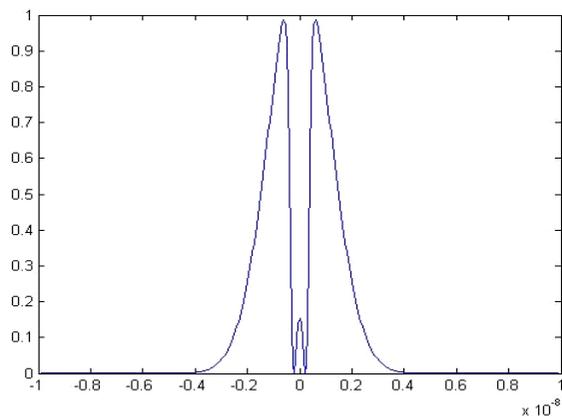


Рис. 12. Расчетный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ($\Delta t = 0$ нс)

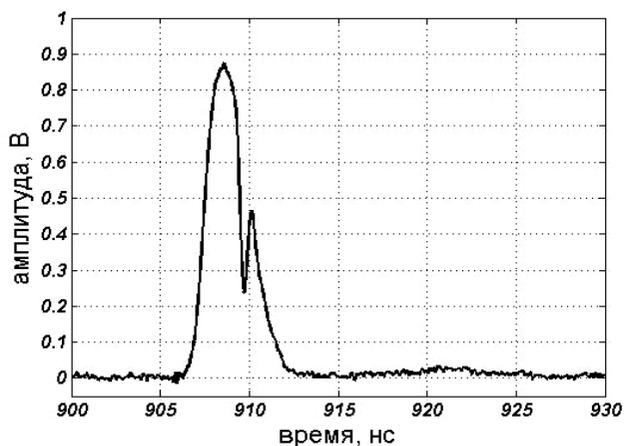


Рис. 13. Экспериментальный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ($\Delta t \approx 1,3$ нс)

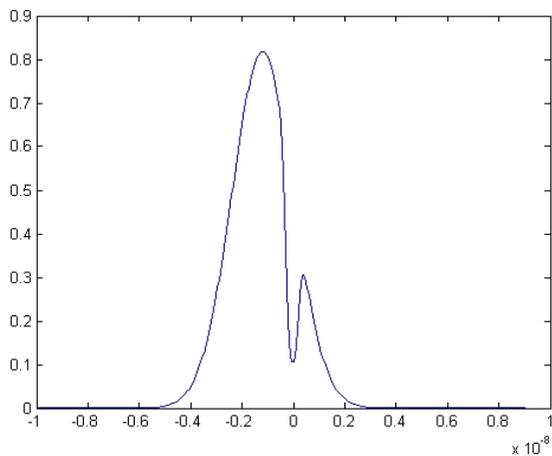


Рис. 14. Расчетный временной профиль импульса накачки на выходе ПАУ-4 ($\Delta t = 1,3$ нс)

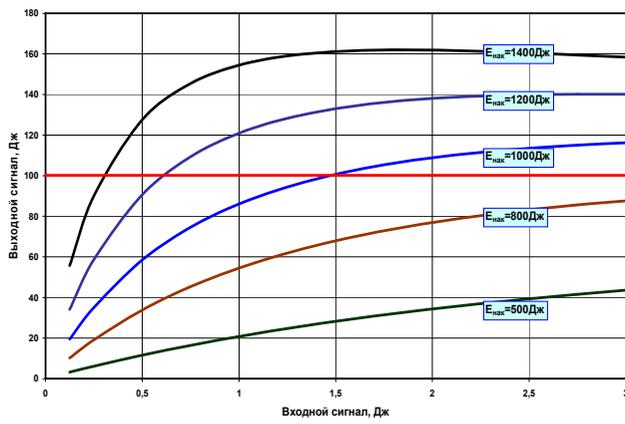


Рис. 15. Расчетные зависимости выходной энергии ПАУ-4 от входной при различных энергиях накачки, где $\tau_{0,5 \text{ накл}} = 3 \text{ нс}$, $\tau_{0,5 \text{ сигн}} = 0,5 \text{ нс}$, $L_{\text{кр}} = 5,5 \text{ см}$

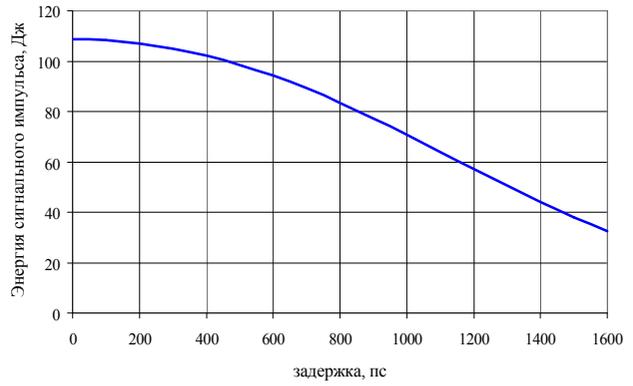


Рис. 16. Расчетная зависимость энергии на выходе из ПАУ-4 при рассинхронизации импульсов от 0 до 1000 пс, при накачке 1000 Дж и входном сигнале 2 Дж

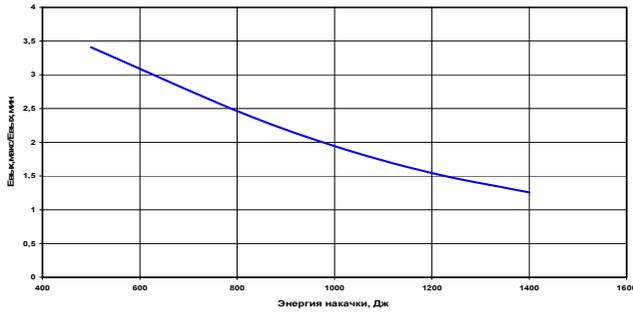


Рис. 17. Расчетная зависимость $E_{\text{вых. макс}}/E_{\text{вых. мин}}(E_{\text{нак.}})$ для $E_{\text{вх. макс}} = 2,5 \text{ Дж}$, $E_{\text{вх. мин}} = 0,5 \text{ Дж}$ ($E_{\text{вх. макс}}/E_{\text{вх. мин}} = 5$)

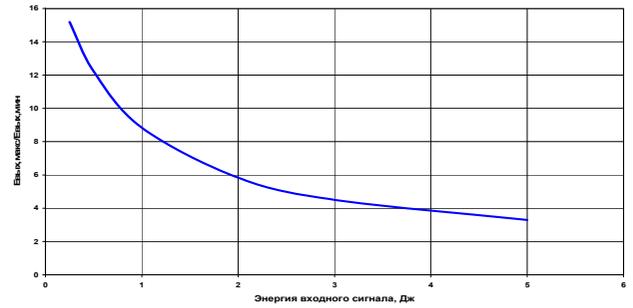


Рис. 18. Расчетная зависимость $E_{\text{вых. макс}}/E_{\text{вых. мин}}(E_{\text{вх.}})$ для $E_{\text{нак. макс}} = 1200 \text{ Дж}$, $E_{\text{нак. мин}} = 400 \text{ Дж}$ ($E_{\text{нак. макс}}/E_{\text{нак. мин}} = 3$)

Численное исследование параметрического усиления при изменении значений параметров системы. Способы увеличения энергетики

В экспериментах на фемтосекундном канале установки «Луч» была получена энергия усиленных импульсов $\approx 110 \text{ Дж}$, соответствующая ей мощность скомпрессированного импульса составила $\approx 1 \text{ ПВт}$. В лазерной физике появляется интерес к еще более мощным лазерным установкам. Данный раздел посвящен описанию способов увеличения мощности фемтосекундного канала установки «Луч».

Существует несколько способов увеличения мощности на фемтосекундном канале установки «Луч»: оптимизация длительности сигнального импульса при различных длинах кристалла (5 см, 5,5 см, 6 см); оптимизация временных форм сигнального импульса и импульса накачки; оптимизация энергии входного сигнала.

1) Рассмотрим, как влияет изменение длительности входного сигнального импульса гауссовой времен

ной формы на энергию параметрически усиленного импульса при различных длинах нелинейных кристаллов.

Рассчитаем энергию усиленного импульса в зависимости от длительности сигнального импульса (0,5–3 нс) при длине нелинейного кристалла 5 см, 5,5 см, 6 см и следующих параметрах: гауссова временная форма сигнального импульса, площадь сигнального пучка ($S_{\text{сигн.}}$) 250 см^2 , длительность сигнального импульса ($\tau_{\text{сигн.}}$) 0,5–3 нс, энергия сигнального импульса ($E_{\text{вх. сигн.}}$, $\lambda = 911 \text{ нм}$) 2 Дж, гауссова временная форма импульса накачки, площадь пучка накачки ($S_{\text{нак.}}$) 350 см^2 , длительность импульса накачки ($\tau_{\text{нак.}}$) 2,5 нс, энергия импульса накачки ($E_{\text{нак.}}$, $\lambda = 527 \text{ нм}$) 1,1 кДж, длина кристалла ($L_{\text{кр.}}$) (5 см, 5,5 см, 6 см), Δt (задержка между сигнальным импульсом и импульсом накачки) 0 (точная синхронизация).

Результаты расчетов представлены на рис. 19. Видно, при длительности сигнального ($\tau_{\text{сигн.}}$) импульса в диапазоне от 1,5 до 2,5 нс максимальная энергия усиленного импульса ($\approx 300 \text{ Дж}$) достигается при длине нелинейного кристалла 6 см.

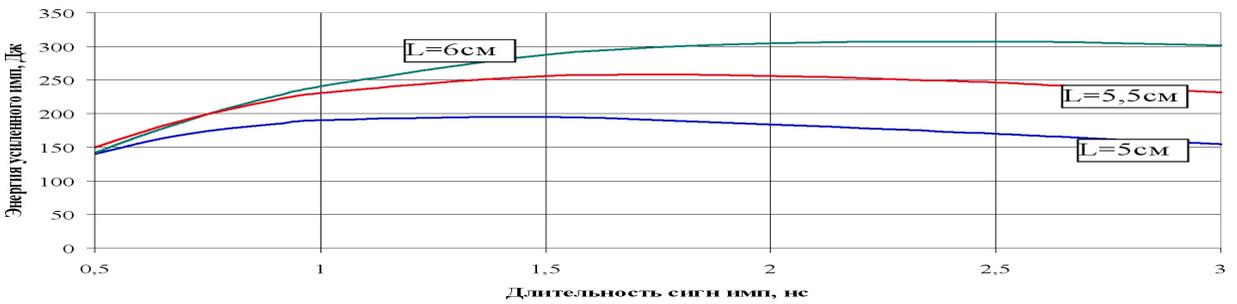


Рис. 19. Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного сигнального импульса от длительности входного сигнального импульса при длине нелинейного кристалла 5 см, 5,5 см, 6 см. $E_{\text{вх.}} = 2$ Дж, $E_{\text{нак.}} = 1,1$ кДж, $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$ нс

2) Рассмотрим, как влияет временная форма сигнального импульса и импульса накачки на энергию параметрически усиленного импульса. Были проведены расчеты для 4-х ситуаций: гауссова форма сигнального импульса и импульса накачки; супергауссова – сигнального импульса и импульса накачки; гауссова – сигнала и супергауссова – накачки; супергауссова – сигнала и гауссова – накачки.

В расчетах были заданы следующие параметры: $S_{\text{сигн.}} = 250 \text{ см}^2$, $\tau_{\text{сигн.}} = (0,5-3)$ нс; $E_{\text{вх. сигн.}} = 2$ Дж, $S_{\text{нак.}} = 350 \text{ см}^2$, $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$ нс, $E_{\text{нак.}} = 1,1$ кДж, $L_{\text{кр.}} = 5,5$ см, $\Delta t = 0$.

Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного импульса от его длительности представлена на рис. 20 в четырех вариантах: гауссовый временной профиль сигнального импульса и супергауссовый – импульса накачки, супергауссовый – сигнального и супергауссовый – накачки, гауссовый – сигнального и гауссовый – накачки, супергауссовый – сигнального и гауссовый – накачки. Видно, что наибольшая энергия (≈ 380 Дж) параметрически усиленного сигнального импульса достигается в случае супергауссовых временных форм сигнального импульса и импульса накачки, при длительности сигнального импульса $\approx (2-3)$ нс.

Можно сделать вывод:

максимальная энергия параметрически усиленного импульса достигается при:

- супергауссовой временной форме импульсов накачки и сигнала: $E_{\text{вых.}} \approx 380$ Дж при $\tau_{\text{вх.}} \approx 2,5$ нс;
- супергауссовой временной форме импульса накачки и гауссовой временной форме импульса сигнала: $E_{\text{вых.}} \approx 360$ Дж при $\tau_{\text{вх.}} \approx 2$ нс.

3) Рассмотрим, как влияет изменение энергии входного сигнального импульса на энергию параметрически усиленного сигнального импульса. Для численного исследования этого метода проведем 3 серии расчетов с различными временными формами импульсов сигнала и накачки: гауссова – сигнала и гауссова – накачки; супергауссовой ($n = 6$) – сигнала и супергауссовой ($n = 6$) – накачки; гауссовой – сигнала и супергауссовой ($n = 6$) – накачки.

В расчетах были заданы следующие параметры: $S_{\text{сигн.}} = 250 \text{ см}^2$, $\tau_{\text{сигн.}} = (0,5 \text{ нс}, 2 \text{ нс})$, $E_{\text{вх. сигн.}} = (0,1-10)$ Дж, $S_{\text{нак.}} = 350 \text{ см}^2$, $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$ нс, $E_{\text{нак.}} = 1,1$ кДж, $L_{\text{кр.}} = 5,5$ см, $\Delta t = 0$.

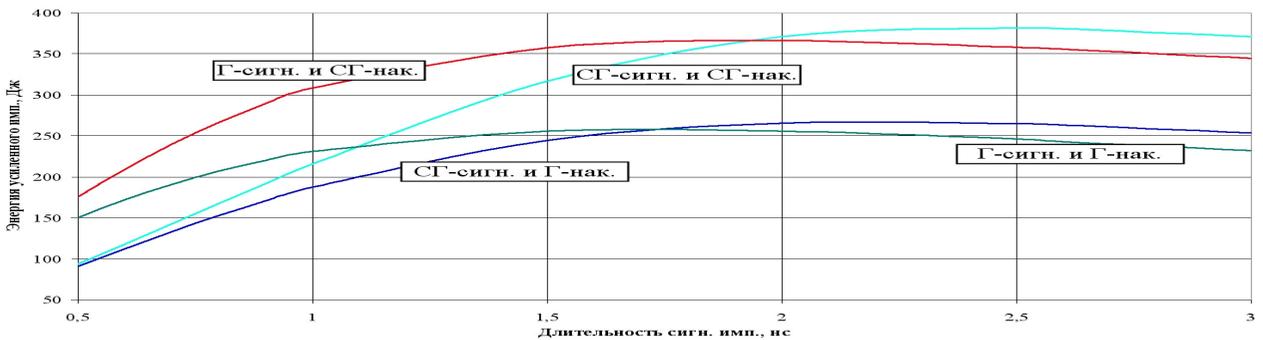


Рис. 20. Расчетная зависимость энергии усиленного сигнального импульса от длительности входного сигнального импульса при $L_{\text{кр.}} = 5,5$ см, $\tau_{\text{нак.}} = 2,5$ нс, $E_{\text{вх.}} = 2$ Дж, $E_{\text{нак.}} = 1,1$ кДж в случае гауссовой (Г) временной формы сигнального импульса и супергауссовой (СГ)-импульса накачки, СГ-сигнала и СГ-накачки, Г-сигнала и Г-накачки

Результаты двух серий расчетов представлены на рис. 21 ($\tau_{\text{сигн.}} = 0,5 \text{ нс}$) и 22 ($\tau_{\text{сигн.}} = 2 \text{ нс}$). Из рис. 21 ($\tau_{\text{сигн.}} = 0,5 \text{ нс}$) видно, что максимальная энергия параметрически усиленного импульса составляет $\approx 150 \text{ Дж}$ при $E_{\text{вх.}} \approx 3 \text{ Дж}$, в случае гауссового временного профиля сигнала.

Из рис. 22 ($\tau_{\text{сигн.}} = 2 \text{ нс}$) видно, что максимальная энергия параметрически усиленного импульса составляет $\approx 400 \text{ Дж}$ при $E_{\text{вх.}} \approx 4 \text{ Дж}$ в случае гауссового временного профиля сигнала и супергауссова – накачки.

Предложенный путь повышения мощности лазерного излучения фемтосекундного канала установки «Луч» заключается в оптимизации временной формы и длительности импульса накачки и chirпированного импульса и не требует повышения энергии накачки выходного параметрического усилителя.

Таким образом, можно дать следующие рекомендации на увеличение энергетика фемтосекундного канала установки «Луч».

Для получения $\approx 350 \text{ Дж}$ в chirпированном импульсе необходимо обеспечить:

- Супергауссовый ($n = 6$) временной профиль импульса накачки;

- гауссовый временной профиль сигнального импульса;
- энергию импульса накачки $\approx 1,1 \text{ кДж}$;
- длительность сигнального импульса $\approx (1,5-2,5) \text{ нс}$;
- длительность импульса накачки $\approx (2-2,5) \text{ нс}$;
- энергию входного сигнального импульса $\approx (1,5-9) \text{ Дж}$;
- длину кристалла DKDP $\approx (5,5-6) \text{ см}$;
- площадь пучка накачки (2ω) 350 см^2 ;
- площадь сигнального пучка ($\lambda = 911 \text{ нм}$) 250 см^2 ;
- точную синхронизацию сигнального импульса и импульса накачки ($\Delta t \leq 0,4 \text{ нс}$).

При дифракционной эффективности решеток компрессора на уровне существующей ($R \approx 90 \%$, $R^4 \approx 66 \%$) в случае получения на выходе системы параметрического усиления энергии chirпированного импульса $E_{\text{вых.}} \approx 350 \text{ Дж}$ после компрессии можно ожидать увеличения мощности лазерного излучения до $P_{\text{вых.}} \approx 3,5-4,5 \text{ ПВт}$ при $\tau_{\text{вых.}} \approx 50 \text{ фс}$. Единственным принципиальным сдерживающим фактором является лучевая прочность дифракционных решеток компрессора.

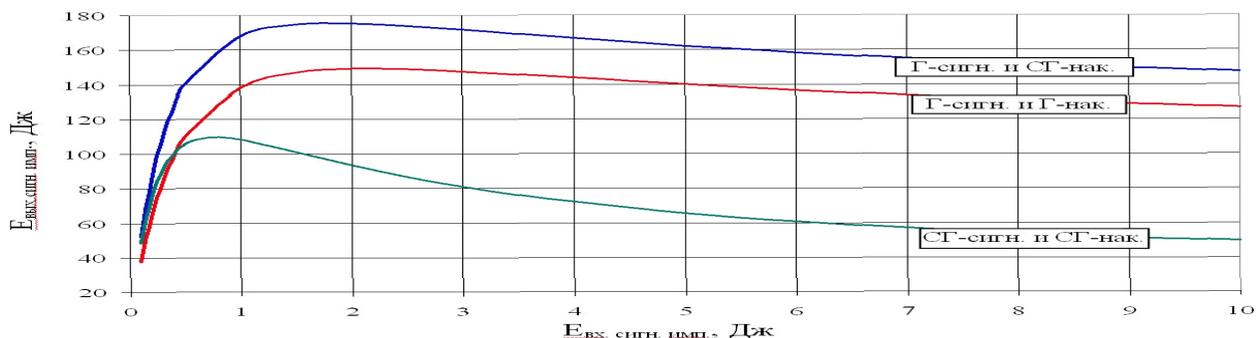


Рис. 21. Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного импульса от энергии входного сигнала, при $L_{\text{кр.}} = 5,5 \text{ см}$, $\tau_{\text{нак.}} = 2,5 \text{ нс}$, $\tau_{\text{сигн.}} = 0,5 \text{ нс}$, $E_{\text{вх.}} = 2 \text{ Дж}$, $E_{\text{нак.}} = 1,1 \text{ кДж}$

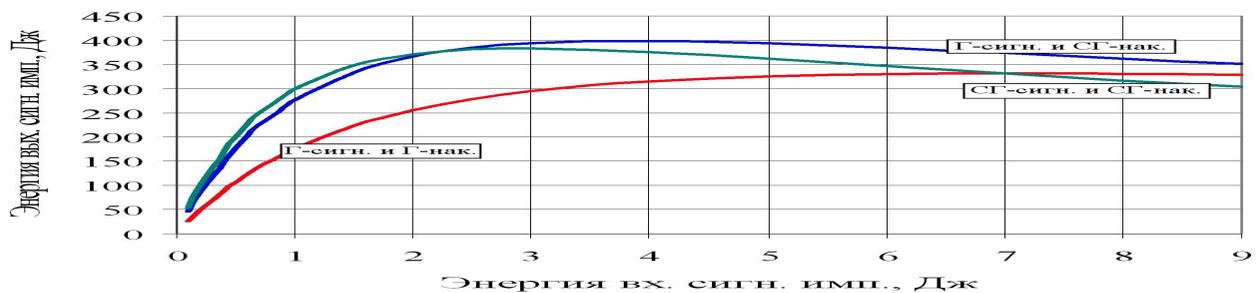


Рис. 22. Расчетная зависимость энергии параметрически усиленного импульса от энергии входного сигнала, при $L_{\text{кр.}} = 5,5 \text{ см}$, $\tau_{\text{нак.}} = 2,5 \text{ нс}$, $\tau_{\text{сигн.}} = 2 \text{ нс}$, $E_{\text{вх.}} = 2 \text{ Дж}$, $E_{\text{нак.}} = 1,1 \text{ кДж}$

Доклад «Исследование энергетики процесса параметрического усиления» посвящен экспериментальному и расчетному исследованию энергетики процесса параметрического усиления в фемтосекундном канале установки «Луч». Результаты исследований заключаются в следующем:

– Проведены эксперименты по усилению chirпированного лазерного импульса в каскадах предварительного параметрического усиления фемтосекундного канала установки «Луч». Получены зависимости энергии параметрически усиленного лазерного импульса от энергии накачки.

– С помощью разработанной компьютерной программы проведено численное описание экспериментально полученных результатов. Интерпретированы ранее проведенные эксперименты по усилению chirпированного импульса в выходном параметрическом усилителе. Получено хорошее ($\approx 20\%$) согласие расчетов и экспериментов.

– На основании полученных экспериментальных и расчетных результатов выработаны рекомендации на точность временной синхронизации импульса накачки и chirпированного импульса. При длительности импульса накачки $\approx 2,5$ нс и длительности chirпированного импульса $\approx 0,4$ нс временная рассинхронизация между ними $\Delta t \approx 1$ нс приводит примерно к 30 % потери в энергии.

– Численно исследовано влияние пространственной неоднородности пучков входного сигнала и накачки на неоднородность параметрически усиленного chirпированного импульса. Показано, что для уменьшения неоднородностей выходного пучка выгодно обеспечивать более высокий уровень входного сигнала и интенсивности накачки. Неоднородность пучка накачки в ближней зоне увеличивает неоднородность параметрически усиленного сигнального пучка.

– На основании расчетных данных выработаны рекомендации для получения на фемтосекундном канале установки «Луч» chirпированных лазерных импульсов с энергией ≈ 350 Дж. Для этого необходимо обеспечить супергауссовый ($n \approx 6$) временной профиль импульса накачки с энергией $E_{\text{нак.}} \approx 1,1$ кДж и длительностью $\tau_{\text{нак.}} \approx (2-2,5)$ нс и гауссовый временной профиль сигнального импульса с энергией $E_{\text{сигн.}} \approx 2$ Дж и длительностью $\tau_{\text{сигн.}} \approx (1,5-2,5)$ нс. При этом длина кристалла DKDP выходного параметрического усилителя должна составлять $\approx (5,5-6)$ см.

1. Ахманов С. А., Выслоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.

2. Penington M. D., Perry M. D., Stuart B. C., Boyd R. D. et. al. Petawatt laser system // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3047. P. 490–500.

3. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 31, № 2, 2001. С. 95–119.

4. Пискаркас А., Стабинис А., Янкаускас А. Фазовые явления в параметрических усилителях и генераторах сверхкоротких импульсов света // УФН. 150. Вып. 1. 1986. С. 127–143.

5. Ross I. N., Matousek P., Towrie M., Collier A. J. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers // Optics Communications 144. December 1, 1997. P. 125–133.

6. Freidman G. I., Andreev N. F., Bepalov V. I., Bredikhin V. I. et. al. Super Broadband Parametric Amplification for Multi-Petawatt Optical Pulse Generation. International Symposium «Topical Problems of Nonlinear Physics», Institute of Applied Physics, RAS. – Nizhny Novgorod, 2003. Proceedings. P. 203–204.

7. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И., Кириллов Г. А. и др. Канал мощной установки «ЛУЧ» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.

8. Lozhkarev V. V., Freidman G. I., Ginzburg V. N., Katin E. V. et. al. 200 TW 45fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification // Optics Express. 2006. Vol. 14, N 1. P. 446–454.

9. Гаранин С. Г., Гинзбург В. Н., Катин Е. В. и др. Получение мощных сверхкоротких световых импульсов на основе широкополосного параметрического усиления chirпированных импульсов в кристаллах DKDP. Экспериментальные результаты и перспективы. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 9. С. 210–223.

10. Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Бредихин В. И. и др. Новая схема петаваттного лазера на основе невырожденного параметрического усиления chirпированных импульсов в кристаллах DKDP // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. Вып. 4. С. 178–182.

11. Bepalov V. I., Bredikhin V. I., Freidman G. I. et al. «Multi-cascade non-degenerated optical parametric chirped-pulse amplifier based on KD*P crystals» in Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-2004, May 16–21, San Francisco, California, 2004, C. CFB4.