ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ «ФЕМТО» ПРИ НАКАЧКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

Р. Ю. Костюнин

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

Разработана и технически реализована схема накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 петаваттного лазерного канала установки «Луч» от усилительного каскада У-1 этой установки.

Разработана и технически реализована схема точной временной синхронизации импульса накачки и чирп-импульса на силовом параметрическом усилителе ПАУ-3.

Представлены основные результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований по усилению лазерного излучения в силовом параметрическом усилителе ПАУ-3 в опытах по облучению мишеней 2015 г.

1. Введение

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в разработке и создании лазерных систем с импульсами фемтосекундной длительности. В ведущих лазерных лабораториях мира созданы установки субпетаваттного и петаваттного уровней мощности с длительностью лазерного импульса $\approx(30-500)$ фс. Появление нового инструмента привело к развитию целого ряда направлений исследований: генерация быстрых электронов и ионов, включая генерацию протонных пучков; генерация жесткого рентгеновского излучения; инициирование ядерных реакций и др. Различные научные группы проводят теоретический анализ и экспериментальные исследования по определению возможности «быстрого зажигания» (fast ignition) термоядерной мишени на основе одновременного воздействия лазерного излучения наносекундной и фемтосекундной длительностей (см., например, обзоры [1–4]).

В РФЯЦ-ВНИИЭФ действует лазерная система петаваттного уровня мощности (фемто-канал установки «Луч»), на которой ранее были проведены эксперименты по облучению мишеней при интенсивности $I_{\text{миш}} \sim 10^{19}\ \text{Вт/см}^2$ [5], при энергии лазерного импульса на мишени $E_{\text{лаз}} \approx 1$ Дж, диаметре пятна фокусировки $\varnothing_{\text{фок}} \approx 15$ мкм, длительности лазерного импульса $\tau_{\text{имп}} \approx 50$ фс.

В 2015 г. стояла задача проведения облучательных опытов при интенсивности $I_{\text{миш}} \sim 10^{20}\ \text{Вт/см}^2$, целью которых было исследование генерации высокоэнергетичных заряженных частиц ($E_{\text{прот}} \geq 10$ МэВ) и жесткого рентгеновского излучения (РИ) ($E_{\text{РИ}} \geq 1$ МэВ). Выполнение этой задачи в условиях экспериментов на фемто-канале установки «Луч» при работе с силовым параметрическим усилителем ПАУ-3 потребовало кардинальной модернизации лазерной системы для уменьшения размера пятна фокусировки ($\varnothing_{\text{фок}} \approx 10-15$ мкм) и повышения энергии лазерного импульса на мишени ($E_{\text{миш}} \approx 5$ Дж).

2. Схема установки

Фемто-канал установки «Луч» представляет собой лазерную установку петаваттного уровня мощности со сверхкороткой ($\tau_{\text{имп}} \approx 50$ фс) длительностью импульса излучения. Эта установка построена по принципу параметрического усиления чипированного лазерного импульса в нелинейных кристаллах DKDP с накачкой импульсами неодимового лазера, преобразованными во вторую гармонику ($\lambda_{\text{нак}} = \lambda_{2\omega} = 527$ нм). Установка предназначена для проведения экспериментальных исследований по взаимодействию высокоинтенсивного $\left(I \geq 10^{19}\ \text{Вт/см}^2\right)$ лазерного излучения с веществом.

Установка состоит из:

– стартовой системы и системы предварительного параметрического усиления, в которой происходит генерация ультракороткого ($\tau_{имп} \sim 50$ фс) лазерного импульса, растяжение его в стретчере до длительности $\tau \approx 0{,}5$ нс и усиление в трехкаскадном предварительном параметрическом усилителе (ПАУ-1 и ПАУ-2) до энергии $E_{вых} \approx (25-50)$ мДж. Импульс может быть скомпрессирован до мощности $P_{вых,1} \approx 0{,}5$ ТВт;

– 100-тераваттной системы (ПАУ-3), 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 (ПАУ-4), обеспечивающей параметрическое усиление чирпированного 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.

На данный момент ввиду неудовлетворительного состояния материальной базы оконечный параметрический усилитель ПАУ-4 выведен из схемы установки.

Как отмечено выше, одной из поставленных задач являлось проведение облучательных опытов при интенсивности $I_{миш} \sim 10^{20}$ Вт/см^2. Достижение такой интенсивности облучения мишени возможно при усилении лазерного чирп-импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3 до энергии $E_{ПАУ\text{-}3} \approx (10-15)$ Дж. Для этого энергия излучения накачки ПАУ-3 должна составлять $E_{нак.ПАУ\text{-}3} \approx 60$ Дж на второй гармонике или $E_{нак.ПАУ\text{-}3} \approx 160$ Дж на первой гармонике при имеющимся кристалле преобразователе. Однако лазер накачки «Лучик» этого усилителя не обеспечивает требуемую энергию импульса накачки на первой гармонике, так как он обладает рядом существенных недостатков, обусловленных как неудачными схемными решениями, так и крайне устаревшей материальной базой. В этой связи представляется перспективной идея использования усилителя канала установки «Луч» в качестве оконечного усилителя системы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3.

В среде Fresnel было проведено моделирование усиления в предложенной схеме накачки каскада параметрического усиления ПАУ-3, которое показало, возможность достижения энергии излучения накачки до 200 Дж на первой гармонике.

3. Схема системы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 от импульса излучения лазерного канала установки «Луч»

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки в части силового усилителя ПАУ-3, включающая схему инжекции чирпированного лазерного импульса с выхода частотной части предварительного параметрического усиления, систему накачки с использованием усилителя У-1 установки «Луч» и сам ПАУ-3.

Импульс излучения с выхода предварительной части усиления лазера накачки «Лучик», а именно усилителя КВ-85, направляется в усилитель У-1 канала «Луча». Для этого установили оптическую схему заведения пучка, состоящую из 5 широкоапертурных зеркал. Далее для транспортировки лазерного импульса накачки с выхода У-1 до кристалла-преобразователя излучения во вторую гармонику установили еще 5 широкоапертурных зеркал. В преобразователе излучения во вторую гармонику применяется кристалл KDP толщиной 18 мм, первый тип синхронизма. После преобразования во вторую гармонику импульс накачки в штатной схеме поступает на вход силового параметрического усилителя ПАУ-3. При усилении лазерного импульса в У-1 до энергии ≈ 150 Дж плотность энергии на первой гармонике на выходе усилителя достигнет 4 Дж/см^2 (диаметр пучка ≈ 7 см), что может привести к повреждению активных элементов усилителя У-1. В связи с этим на входе усилителя У-1 для расширения пучка и на выходе усилителя У-1. Для уменьшения размера пучка оптическую схему дополнили двумя 1,5-кратными телескопами, составленными из рассеивающих линз с фокусным расстоянием $f = -2$ м и собирающих линз с фокусными расстоянием $f = +3$ м. В такой постановке размер пучка накачки согласуется с размером пучка сигнального излучения в плоскости нелинейного кристалла силового параметрического усилителя ПАУ-3.

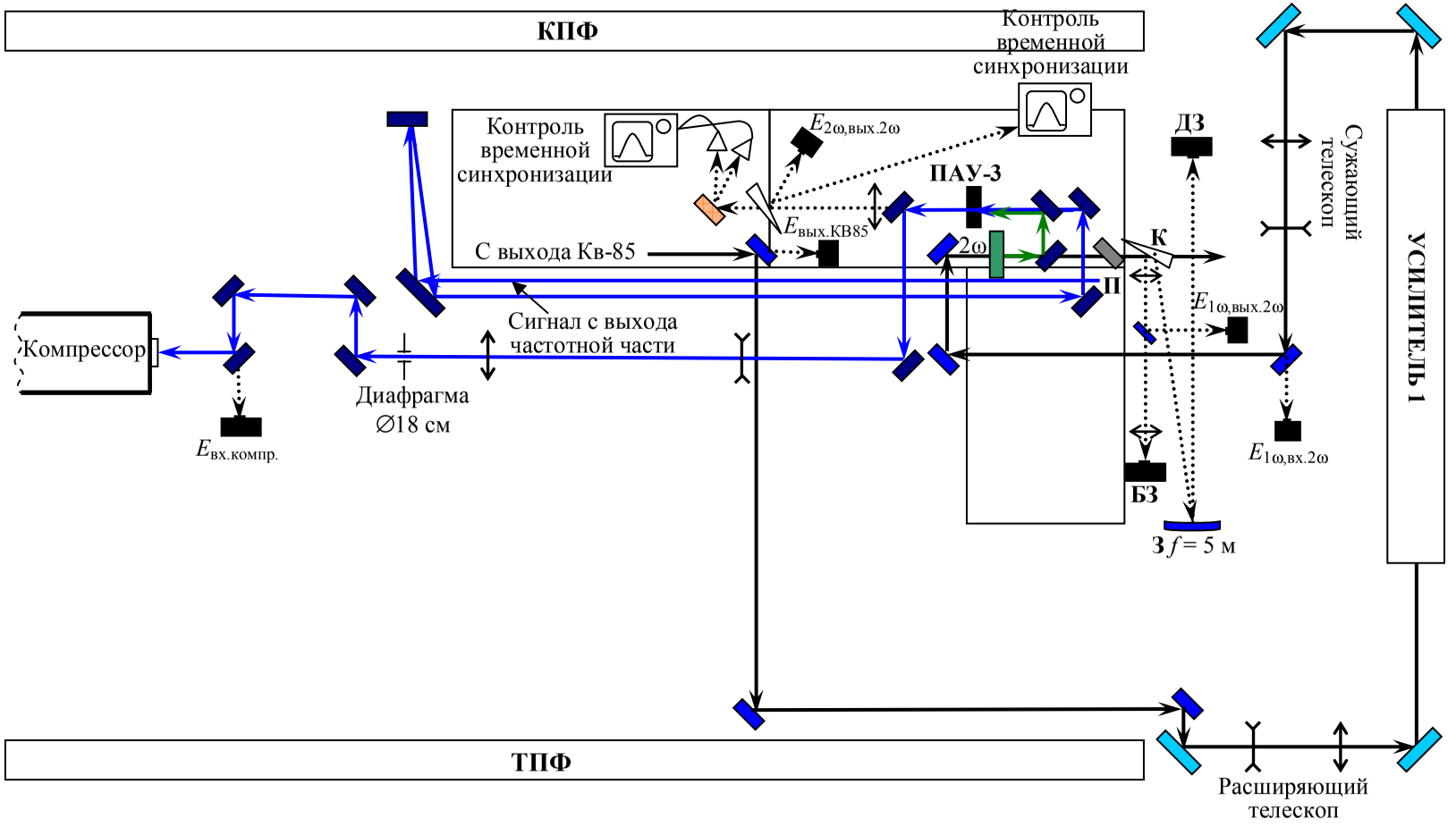


Рис. 1. Схема лазерной установки в экспериментах по облучению мишеней

Также в связи с изменением схемы системы накачки ПАУ-3 с включением в нее усилителя У-1 «Луча», были установлены дополнительные системы регистрации (в соответствии с рис. 1). В экспериментах измерялись следующие энергетические параметры лазерного излучения:

– энергия на выходе квантрона с диаметром стержня 85 мм – $E_{\text{вых}}$ кв85;

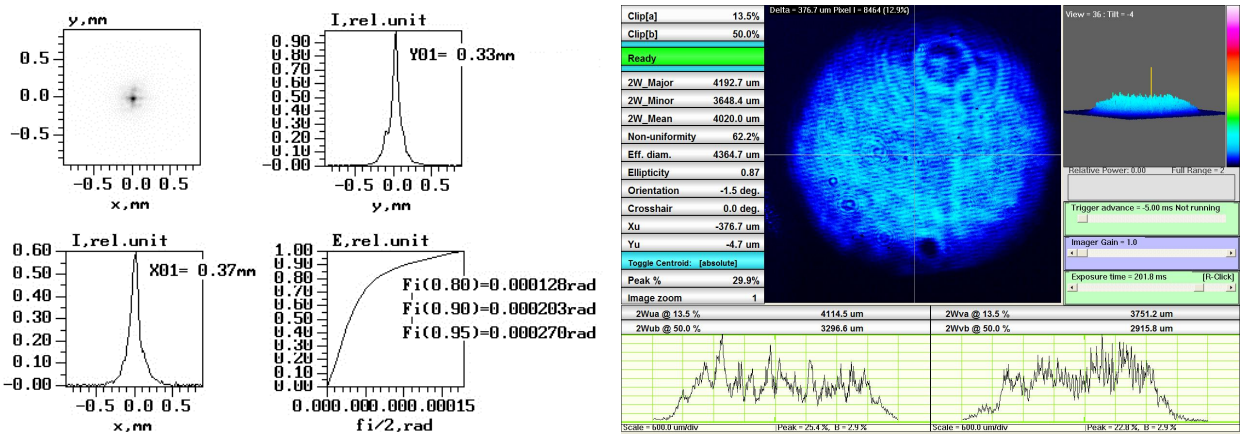
– энергия на первой гармонике на входе в кристалл-преобразователь во вторую гармонику – $E_{1\omega}$ вх2ω;

– энергия на первой гармонике на выходе кристалла-преобразователя во вторую гармонику – $E_{1\omega}$ вых2ω;

– энергия на второй гармонике на выходе кристалла-преобразователя во вторую гармонику – $E_{2\omega}$ вых2ω;

– энергия усиленного чирп-импульса на входе в компрессор – $E_{\text{вх.компр.}}$.

Во время работы усилителя У-1 установки «Луч» при наивысших коэффициентах усиления необходимо контролировать качество пучка излучения накачки. Для этого в данной схеме установили регистрацию ближней зоны излучения на входе в кристалл-преобразователь во вторую гармонику и дальней зоны излучения с использованием сферического зеркала с фокусом $f = 5$ м (БЗ, ДЗ на рис. 1). На рис. 2,а,б представлено распределение излучения в дальней и ближней зонах, соответственно, на входе в кристалле-преобразователь в 2ω при включении квантронов ∅ = 10, 20, 60 и 85 мм разовой части. Расходимость пучка составляет $\theta_{0,8E} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-4}$ рад, диаметр пучка равен ≈7,1 см. Анализ полученных результатов показал, что пиковая плотность энергии на входе в кристалл-преобразователь в 2ω при $E_{1\omega} \approx 140$ Дж достигает ε ≈ 3,5 Дж/см^2.



а б

Рис. 2. Распределение интенсивности излучения накачки в дальней (а), в ближней (б) зонах на кристалле – 2ω каскада ПАУ-3 при включении квантронов ∅ 10, 20, 60 и 85 мм разовой части

Далее, при использовании юстировочного излучения, оптический путь которого точно совмещен с оптическим путем рабочего сигнального излучения, была получена дальняя зона излучения на входе в компрессор, представленная на рис. 3. По уровню интенсивности $1/e^2$ размер пучка в фокусе линзы $F = 150$ см составляет $D \approx 25$ мкм. Фокусное расстояние внеосевой параболы, с помощью которой осуществляется фокусировка лазерного пучка на мишень, равно $F_{\text{п}} = 80$ см, поэтому на мишени ожидаемый диаметр пятна фокусировки составит $D_{\text{фок}} \approx 13$ мкм.

Вследствие того, что введение усилителя У-1 установки «Луч» в схему тракта накачки ПАУ-3 увеличило оптический путь следования лазерного импульса на ≈26 м, потребовалось дополнительная корректировка временной синхронизации. Соответственно, для обеспечения согласования по времени импульсов сигнала и накачки необходимо было удлинить линию задержки сигнального излучения. Что и было сделано за счет введения в оптический тракт четырех зеркал и сужающий

телескоп Галилея для компенсации естественной расходимости пучка. Для контроля точности временной синхронизации прихода импульса накачки и чирп-импульса на силовой параметрический усилитель ПАУ-3 разработали и реализовали систему регистрации импульсов сигнала и накачки после ПАУ-3 (рис. 1). Она также позволяет судить о синхронизации излучений в ПАУ-3 во время проведения облучательных экспериментов.

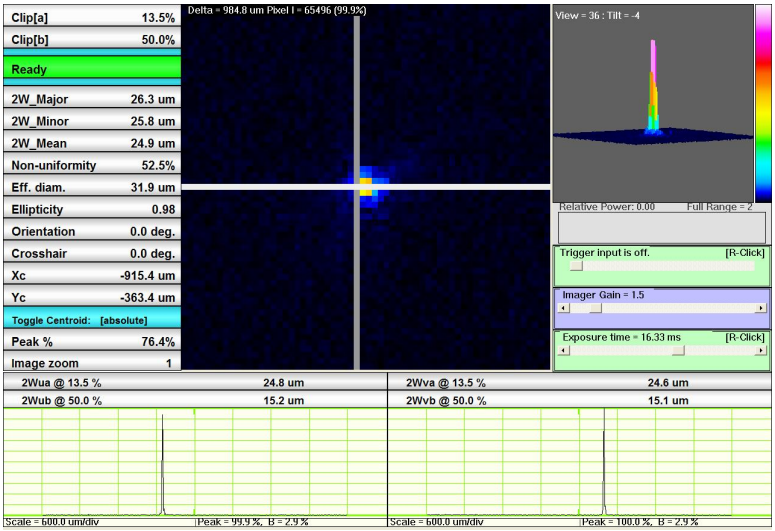


Рис. 3. Распределение излучения юстировочного лазера
в дальней зоне на входе в компрессор

4. Усиление чирп-импульса в ПАУ-3

Как отмечалось выше, модернизация схемы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 проводилась с целью повышения выходной энергии чирп-импульса, и, соответственно, достижения интенсивности облучения мишени $I_{\text{миш}} \sim 10^{20}$ Вт/см^2. Эксперименты по облучению мишеней проводились на установке с измененной схемой, описанной в разделе 1.1, а именно при накачке ПАУ-3 от усилителя У-1 лазерного канала установки «Луч».

Опыты №№ 30.10.15/3 и 03.11.15/2 проводились при напряжении на накопителе энергии У-1 $U_{\text{зар}} = 23$ кВ, остальные – при $U_{\text{зар}} = 22$ кВ. В табл. 1 представлены полученные параметры лазерного излучения.

Энергия лазерного импульса на входе в усилитель $E_{\text{вх.У-1}}$ в опытах была достаточно стабильна и находилась в диапазоне от 32 до 36 Дж. При напряжении на конденсаторной батарее $U_{\text{зар}} = 22$ кВ энергия лазерного импульса на первой гармонике на выходе усилителя У-1 также была стабильна и составляла $E_{\text{вых.У-1}}$ от 155 до 175 Дж.

Энергия на входе в кристалл-преобразователь в 2ω $E_{1\omega,\text{вх.}2\omega}$ от 140 до 150 Дж. Длительность лазерного импульса на первой гармонике на входе в кристалл-преобразователь в 2ω находилась в диапазоне $\tau_{1\omega}$У-1 от 1,33 до 1,6 нс. Среднее значение составляет $(\tau_{1\omega}\text{У-1})_{\text{ср}} \approx 1{,}4$ нс. При диаметре пучка на входе в кристалл-преобразователь в 2ω $\varnothing \approx 7$ см и средней его энергии $(E_{1\omega}\text{вх}2\omega)_{\text{ср}} \approx 150$ Дж интенсивность пучка составляла $I_{1\omega} \approx 2{,}8$ ГВт/см^2.

КПД преобразования во вторую гармонику по результатам энергетических измерений $\eta = E_{2\omega}/E_{1\omega}\text{вх}2\omega$ в экспериментах по облучению мишеней составил $\eta \approx 41$ %. Энергия накачки ПАУ-3 была достаточно стабильна и составляла $E_{\text{нак}} = E_{2\omega}$ от 57 до 65 Дж.

Длительность импульса накачки ПАУ-3 определялась по ранее проведенным экспериментам, в которых не производилось параметрическое усиление в ПАУ-3, а также по результатам опытов, в которых энергия на выходе ПАУ-3 была ≤ 2 Дж (таким образом, временная форма лазерного импульса на второй гармонике не искажалась «выеданием» накачки): $\left(\tau_{2\omega}\right)_{\text{ср}} \approx 1{,}27$ нс. Интенсивность пучка накачки ПАУ-3 в опытах по облучению мишеней составляла $\left(I_{\text{нак}}\right)_{\text{ср}} \approx 1{,}3$ ГВт/см^2.

Таблица 1

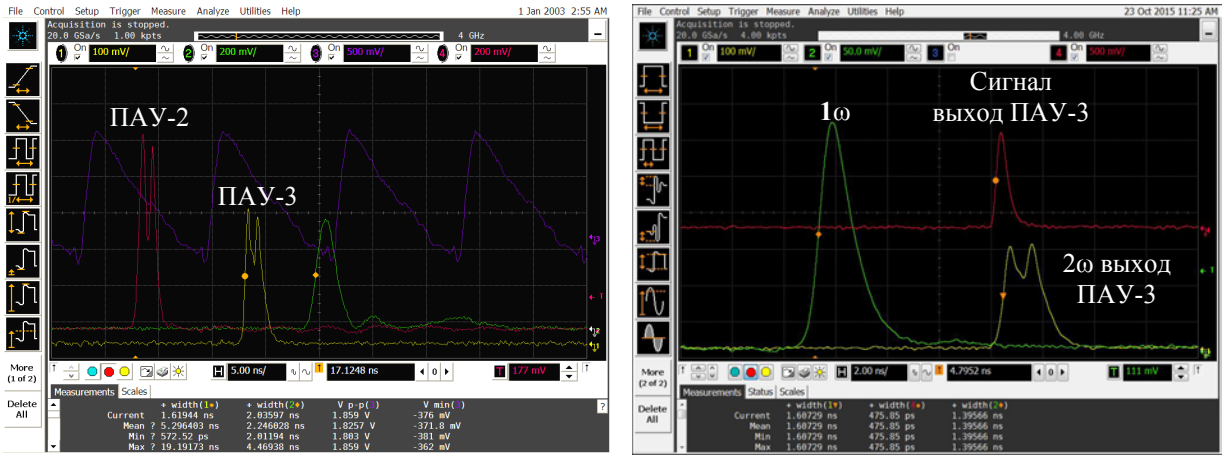
Параметры лазерного излучения в экспериментах по облучению мишеней

№ опыта	$E_{\text{вх.}}$ У-1 Дж	$E_{\text{вых.}}$ У-1 Дж	$E_{1\omega}$ вх.2ω Дж	$E_{2\omega}$ вых.2ω Дж	$\eta_{2\omega}$ %	$E_{\text{вых.}}$ ПАУ-3 Дж	$E_{\text{вх.компр.}}$ Дж	$\tau_{1\omega}$ У-1 нс	$\tau_{\text{чирп}}$ нс	$\tau_{2\omega}$* нс
23.10.15	32,2	155,8	140,8	56,5	40	7,7	6,1	1,4	0,48	–
26.10.15	-	160,1	144,7	57,3	40	1,5	1,2	1,6	0,5	1,23
28.10.15/1	33,4	160,1	144,7	61,8	43	2,4	1,9	1,41	0,46	1,35
28.10.15/2	33,6	160,1	144,7	63,7	44	4,1	3,3	1,35	–	1,46
28.10.15/3	35,6	168,7	152,5	65	43	2,6	2,1	1,34	–	1,34
28.10.15/4	35,1	168,7	152,5	60,4	40	8	6,4	1,35	0,44	1,84
29.10.15/1	33,9	160,1	144,7	59,3	41	6,8	5,4	1,41	–	1,65
29.10.15/2	34,6	164,4	148,6	–		8,7	6,9	1,33	0,48	1,73
30.10.15/1	34,6	164,4	148,6	–		5	4	1,39	–	–
30.10.15/2	35,9	173	156,4	–		8,3	6,6	1,34	0,51	1,78
30.10.15/3	34,2	168,7	152,5	–		8,2	6,5	1,34	0,51	1,74
03.11.15/1	35,9	168,7	152,5	59,8	39	8,3	6,6	1,46	0,5	1,73
03.11.15/2	35,3	177,3	160,3	65,1	41	8,8	7	1,4	0,48	1,63

* Временная форма лазерного импульса регистрировалась после ПАУ-3, при этом «выедание» накачки из-за перекачки энергии в параметрически усиливаемую волну не отражает реальной картины на входе в ПАУ-3.

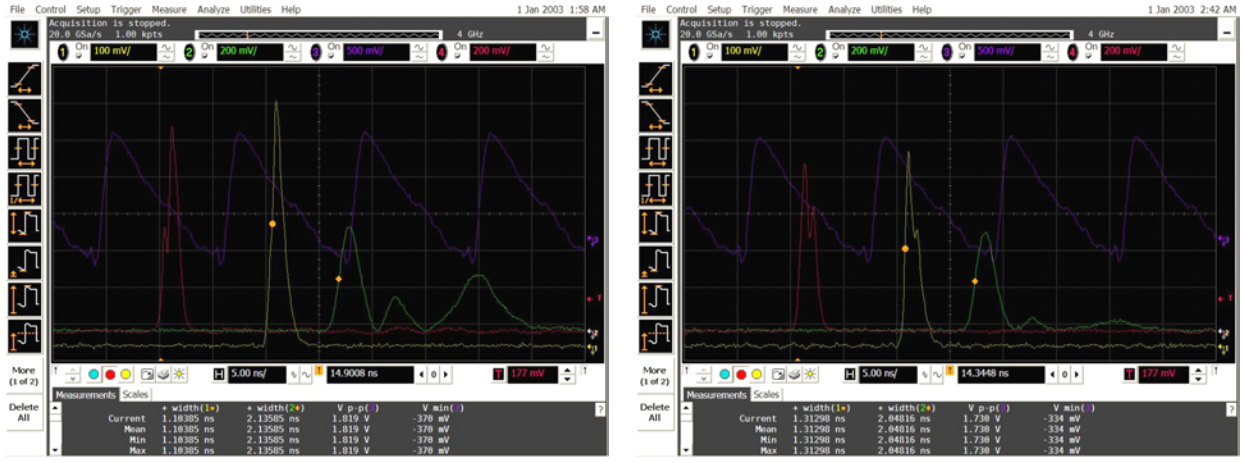
В большинстве проведенных экспериментах по облучению мишеней лазер накачки работал стабильно. Кроме того анализ полученных осциллограмм показал, что в 8 опытах из 13 удалось добиться достаточной для усиления точности синхронизации, когда «выедание» накачки на ПАУ-3 происходило в центре импульса 2ω. В этих опытах энергия лазерного импульса на выходе силового параметрического усилителя ПАУ-3 $E_{\text{вых.ПАУ-3}}$ находилась в диапазоне от 7 до 9 Дж. На рис. 4 приведены типичные осциллограммы полученный в штатной схеме регистрации и в схеме точной временной синхронизации импульсов излучения сигнала и накачки в опыте 23.10.15 ($E_{\text{вых.ПАУ-3}} = 7{,}7$ Дж). На этих осциллограммах хорошо видно «выедание» накачки на параметрических усилителях ПАУ-2 и ПАУ-3.

Однако в опытах 26.10.15/1, 28.10.15/1, 28.10.15/2, 28.10.15/3 и 30.10.15/1 не удалось добиться требуемой энергии чирп-импульса на выходе силового параметрического усилителя ПАУ-3. Зарегистрированные значения энергии лазерного импульса $E_{\text{вых.ПАУ-3}}$ находились в диапазоне от 2 до 5 Дж. Рассмотрение полученных распределений в ближней и дальней зонах не выявило значительных отклонений от типичных характеристик. В тоже время анализ осциллограмм показал, что в этих экспериментах временное рассогласование импульсов сигнала и накачки в силовом параметрическом усилителе ПАУ-3 было большим 0,1 нс. На осциллограммах, полученных в опытах 26.10.15/1 и 30.10.15/1, представленных на рис. 5 видно, как «выедание» накачки на ПАУ-3 происходило на краю импульса 2ω (кривая желтого цвета). Это связано с нестабильной работой системы синхронизации лазера.



а б

Рис. 4. Осциллограммы лазерных импульсов накачки на выходе усилителей ПАУ-2 и ПАУ-3, иллюстрирующие временную синхронизацию импульсов накачки и сигнала на параметрических усилителях ПАУ-2 и ПАУ-3 в штатной схеме регистрации (а); в схеме точной временной синхронизации (б)



а б

Рис. 5. Осциллограммы, иллюстрирующие временную синхронизацию импульсов накачки и сигнала на параметрических усилителях ПАУ-2 и ПАУ-3 в опытах с рассогласованием по времени >0,1 нс: а – опыт 26.10.15/1. $E_{\text{вых.ПАУ-3}}$ = 1,5 Дж; б – опыт 30.10.15/1. $E_{\text{вых.ПАУ-3}}$ = 5 Дж

Помимо экспериментального исследования энергетических характеристик усиления силовом параметрическом усилителе ПАУ-3 производилось и его компьютерное моделирование. С помощью разработанной компьютерной модели параметрического усиления, которая решает систему дифференциальных уравнений для связных волн [6], был проведен численный анализ результатов экспериментов. Модель переписана в среде «Matlab», в ней учитывается временной профиль пучка излучения накачки и инжектируемого излучения, задается шаг по времени (0,05 пс) и рассматриваемый временной промежуток (10 нс). Исходные параметры лазерного излучения для расчетов представлены в табл. 2. Данные расчеты являются одномерными (интенсивность каждого пучка считается одинаковой на всей площади поперечного сечения).

Результаты произведенных вычислений представлены черными кривыми на рис. 6. Верхняя пунктирная кривая соответствует зависимости выходной энергии усиленного в ПАУ-3 чирп-импульса от энергии излучения накачки при $E_{\text{вх.}}$ = 12 мДж и $\tau_{\text{нак.}}$ = 1,25 нс. Нижняя пунктирная кривая получена в результате расчета при $E_{\text{вх.}}$ = 8 мДж и $\tau_{\text{нак.}}$ = 1,35 нс. Интервал заданный этими двумя расчетными кривыми определяет значения выходной энергии при флуктуациях некоторых параметров излучений на входе в ПАУ-3, имевших место в проведенных опытах по облучению

мишеней. На том же рисунке зелеными точками отмечены экспериментальные данные. Отметим, что на график были помещены только те значения энергии, которые были зарегистрированы в опытах с достаточно хорошей временной синхронизацией импульсов накачки и сигнала ($\Delta t \leq 0{,}1$ нс). Незначительный разброс экспериментальных точек обусловлен нестабильностью работы данной лазерной системы.

Таблица 2

Параметры сигнального излучения и излучения накачки в ПАУ-3, закладываемые в расчеты

Диаметр сигнального пучка	7 см
Диаметр пучка накачки	7 см
Длительность сигнального импульса	0,48 нс
Длительность импульса накачки	1,25 – 1,35 нс
Энергия чирп-импульса на входе в ПАУ-3	8 – 12 мДж
Энергия импульса накачки	50÷70 Дж
Длина нелинейного кристалла DKDP в ПАУ-3	6,5 см

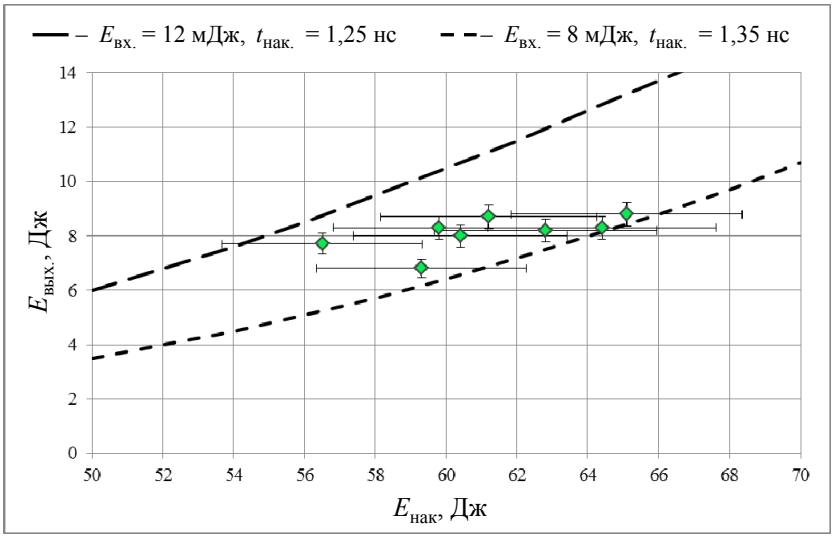


Рис. 6. Зависимость энергии усиленного чирп-импульса на выходе ПАУ-3 от энергии излучения накачки

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает их неплохое качественное и количественное соответствие.

Таким образом, модернизация схемы лазера накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 описанной в разделе 1, а именно использование в качестве оконечного усилителя У-1 лазерного канала установки «Луч», позволила получить энергию усиленного чирп-импульса до 9 Дж, что соответствует энергии скомпрессированного лазерного импульса на мишени до 5 Дж. С учетом зарегистрированных значений длительности лазерного импульса (50 фс) и размера пятна фокусировки, можно сделать вывод о том, что в проведенных опытах интенсивность облучения мишени достигала $I_{миш} \sim 10^{20}$ Вт/см^2. Это подтверждается и изображениями мишени в собственном рентгеновском излучении, полученными с помощью камеры-обскуры.

5. Заключение

В 2015 г. были проведены облучательные эксперименты при интенсивности лазерного пучка на мишени $I_{\text{миш}} \sim 10^{20}$ Вт/см^2 (энергия ≈ 5 Дж, длительность импульса 50 фс, диаметр пятна фокусировки ≈ 8-14 мкм), целью которых было исследование генерации высокоэнергетичных заряженных частиц и жесткого рентгеновского излучения (РИ). Выполнение этой задачи потребовало кардинальной модернизации лазерной системы.

Основные результаты исследований сводятся к следующему.

1. На фемто-канале лазерной установки «Луч» разработана и успешно реализована схема накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3 с применением усилительного каскада У-1 данной установки. Энергия лазерного излучения на выходе У-1 составила $E_{1\omega}$ от 160 до 180 Дж при длительности лазерного импульса ≈ 1,4 нс. После преобразования во вторую гармонику энергия накачки ПАУ-3 в экспериментах по облучению мишеней составила $E_{2\omega}$ от 55 до 65 Дж при длительности лазерного импульса $\tau_{2\omega} \approx 1{,}3$ нс. Интенсивность пучка накачки ПАУ-3 составляла $\left(I_{\text{нак.}}\right)_{\text{ср}} \approx 1{,}3$ ГВт/см^2.

2. Разработана и технически реализована схема точной временной синхронизации импульса накачки и чирп-импульса на силовом параметрическом усилителе ПАУ-3, обеспечивающая разновременность прихода этих импульсов на ПАУ-3 $\Delta t \leq 0{,}1$ нс.

3. Проведено усиление чирпированного лазерного импульса в силовом параметрическом усилителе ПАУ-3. Энергия чирп-импульса на выходе ПАУ-3 достигала 9 Дж. Произведено численное моделирование параметрического усиления чирп-импульса в ПАУ-3. Отмечено хорошее согласование результатов расчетов и экспериментов.

4. Полученные результаты позволили получить энергию скомпрессированного лазерного импульса ($\tau_{\text{имп}} \approx 50$ фс) на мишени до ≈ 5 Дж и достичь интенсивности облучения мишени $I_{\text{миш}} \sim 10^{20}$ Вт/см^2.

Список литературы

1. Крюков П. Г. Фемтосекундные импульсы. – М.: Физматлит, 2008 г.

Фортов В. Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. УФН. 2009. Т. 179, № 6. С. 653 – 687.

2. Коржиманов А. В., Гносков А. А., Хазанов Е. А., Сергеев А. М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов. УФН. 2011. Т. 181, № 1. С. 9 – 32.

3. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии. УФН. 2011. Т. 181, № 4. С. 434 – 441.

4. Belkov S. A., Garanin S. G., Rukavishnikov N.N. RFNC-VNIIEF study into interaction between intense laser pulses and substance. Contributions to Plasma Physics. 2013. Vol. 53. Issue 2. P. 122 – 128.

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