

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ КАНАЛ УСТАНОВКИ «ЛУЧ» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБЛУЧЕНИЮ МИШЕНЕЙ ПРИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ $\sim 10^{20}$ Вт/см²

Р. Ю. Костюнин, А. В. Борщевский, Р. В. Жуков, Д. С. Корниенко, Е. А. Салатов

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

Разработана и успешно реализована новая схема накачки параметрического усилителя ПАУ-3 с применением дискового усилительного каскада установки «Луч», что позволило повысить энергию импульса накачки с 40 до 65 Дж во второй гармонике неодимового лазера. Разработана и технически реализована схема точной временной синхронизации импульса накачки и чирп-импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3.

Приведены основные результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований по усилению чирпированного лазерного импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3 в опытах по облучению мишеней. На выходе параметрического усилителя ПАУ-3 за счет увеличения энергии излучения накачки повышена энергия излучения чирп-импульса с 3 до 9 Дж. При этом энергия лазерного импульса на мишени после компрессии составила 5 Дж при длительности 50 фс и диаметре пятна фокусировки 8 мкм, что соответствует интенсивности 2×10^{20} Вт/см².

В результате проведенных исследований по облучению плоских металлических мишеней получены пучки электронов с энергией до 0,5 МэВ, протонов с энергией до 10 МэВ и жесткого рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 1 МэВ.

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 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. Проводятся 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., напр., обзоры [1–4]).

В РФЯЦ-ВНИИЭФ действует лазерная система с фемтосекундной длительностью импульса ($\tau_{\text{имп}} \approx 50$ фс). Установка применяется для исследования генерации частиц с высокой энергией. Ранее были проведены эксперименты по облучению мишеней при интенсивности 10^{19} Вт/см² [5]. Для увеличения потока частиц и генерации жесткого рентгеновского излучения (РИ) стояла задача проведения облучательных опытов при интенсивности 10^{20} Вт/см². Выполнение этой задачи потребовало кардинальной модернизации лазерной системы, а также разработки методик и аппаратуры измерений параметров корпускулярного и электромагнитного излучений лазерной плазмы.

1. Схема установки

Фемтосекундный канал установки «Луч» построен по принципу трехкаскадного (ПАУ-1, ПАУ-2, ПАУ-3) параметрического усиления чирпированного 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 ($I \geq 10^{19}$ Вт/см²) лазерного излучения с веществом.

Как отмечено выше, одной из поставленных задач являлось проведение облучательных опытов при интенсивности 10^{20} Вт/см². Достижение такой интенсивности облучения мишени возможно при усилении лазерного чирп-импульса в параметрическом усилителе ПАУ-3 до энергии 10–15 Дж. Для этого энергия излучения накачки ПАУ-3 должна составлять 60 Дж на второй гармонике или 160 Дж на первой гармонике при имеющимся кристалле преобразователе. Однако лазер накачки «Лучик» этого усилителя не обеспечивает требуемую энергию импульса накачки на первой гармонике. В этой связи представилось перспективной идея использования усилителя канала установки «Луч» [6] в качестве оконечного усилителя системы накачки силового параметрического усилителя ПАУ-3.

В среде Fresnel [7] 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.

1.1. 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 chirпированного лазерного импульса с выхода частотной части предварительного параметрического усиления, систему накачки с использованием усилителя У-1 установки «Луч» [6] 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, включающую расширяющий и сужающий полторакратные телескопы для предотвращения повреждения активных элементов усилителя

У-1. После преобразования во вторую гармонику в кристалле KDP импульс накачки в штатной схеме поступает на вход силового параметрического усилителя ПАУ-3.

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). На рис. 2,а и 2,б представлено распределение излучения в дальней и ближней зонах, соответственно, на входе в кристалл-преобразователь в 2ω при включении квантронов $\varnothing = 10, 20, 60$ и 85 мм разовой части. Расходимость пучка составляет $\theta_{0,8E} \approx 1,3 \times 10^{-4}$ рад, диаметр пучка равен $\approx 7,1$ см. Анализ полученных результатов показал, что пиковая плотность энергии на входе в кристалл-преобразователь в 2ω при $E_{1\omega} \approx 140$ Дж достигает $\varepsilon \approx 3,5$ Дж/см².

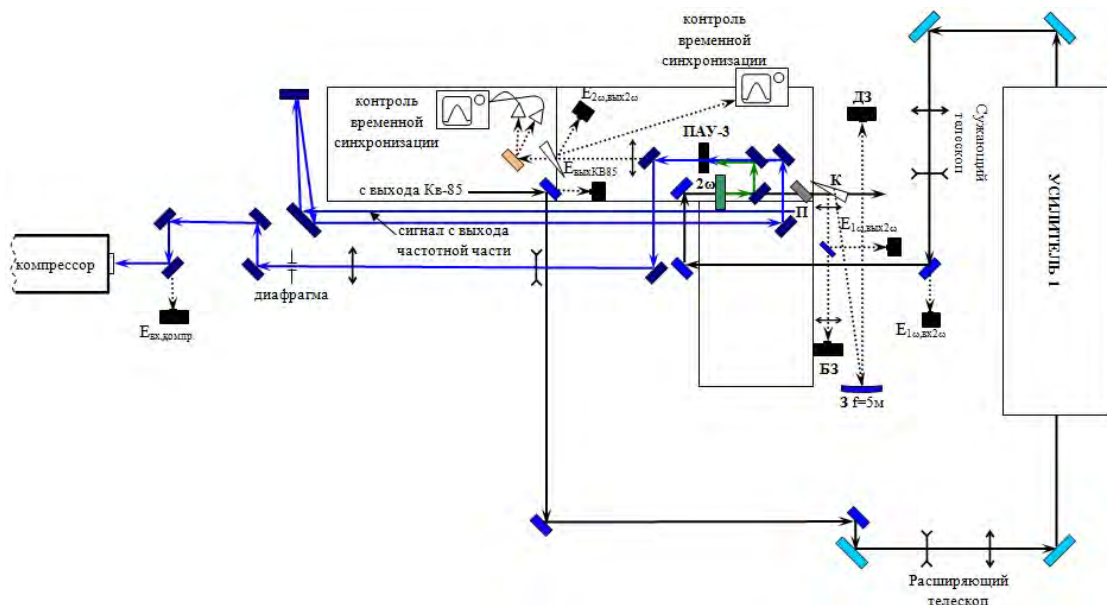


Рис. 1. Схема системы накачки ПАУ-3 с использованием усилителя установки «Луч»

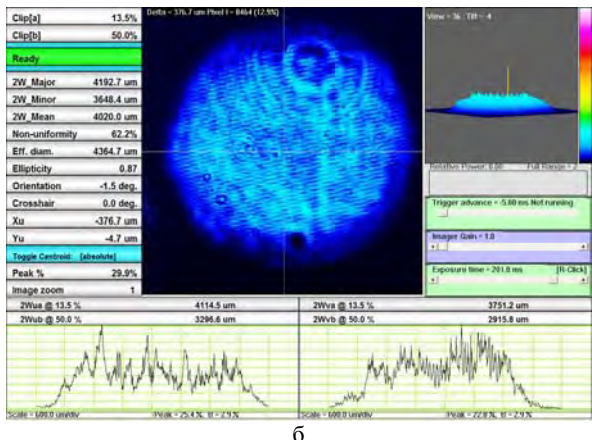
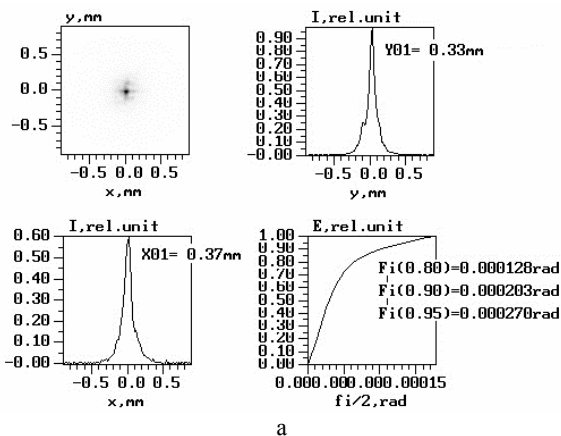


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения накачки в зонах на кристалле- 2ω каскада ПАУ-3 при включении квантронов $\varnothing 10, 20, 60$ и 85 мм разовой части: а – в дальней зоне, б – в ближней зоне

Вследствие введения усилителя У-1 установки «Луч» в схему тракта накачки ПАУ-3 оптический путь следования лазерного импульса удлинился на ≈ 26 м, поэтому аналогично увеличили длину линии задержки чирп-импульса, а также реализовали систему точной временной синхронизации прихода импульса накачки и чирп-импульса на силовой параметрический усилитель ПАУ-3 (рис. 1).

1.2. 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/см². 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». Напряжение на накопителе энергии в опытах варьировалось от 22 до 23 кВ.

Энергия лазерного импульса на входе в усилитель в опытах была достаточно стабильна и находилась в диапазоне от 32 до 36 Дж. Энергия лазерного импульса на первой гармонике на выходе усилителя У-1 также была стабильна и составляла от 155 до 175 Дж.

Энергия излучения на входе в кристалл-преобразователь в 2ω изменялась от 140 до 150 Дж при средней длительности импульса 1,4 нс. При диаметре пучка на входе в кристалл-преобразователь в 2ω 7 см и средней его энергии 150 Дж интенсивность пучка составляла 2,8 ГВт/см².

КПД преобразования во вторую гармонику по результатам энергетических измерений $\eta = E_{2\omega}/E_{1\omega} \times 2\omega$ в экспериментах по облучению мишеней составил $\eta \approx 41\%$. Энергия излучения накачки ПАУ-3 была

достаточно стабильна и составляла от 57 до 65 Дж при длительности лазерного импульса 1,27 нс. Интенсивность пучка накачки ПАУ-3 в опытах по облучению мишеней составляла 1,3 ГВт/см².

Анализ полученных осциллограмм показал, что в большинстве проведенных экспериментах по облучению мишеней 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 находилась в диапазоне от 7 до 9 Дж.

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы, полученные в штатной схеме регистрации, и в схеме точной временной синхронизации импульсов излучения сигнала и накачки в одном из опытов ($E_{\text{выхПАУ-3}} = 7,7$ Дж). На осциллограммах хорошо видно «выедание» накачки на параметрических усилителях ПАУ-2 и ПАУ-3.

Помимо экспериментального исследования энергетических характеристик усиления силовым параметрическим усилителем ПАУ-3 производилось и его компьютерное моделирование. С помощью разработанной компьютерной модели параметрического усиления, которая решает систему дифференциальных уравнений для связанных волн [1, 8], был проведен численный анализ результатов экспериментов. В компьютерной модели 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 таблице. Данные расчеты являются одномерными (интенсивность каждого пучка считается одинаковой на всей площади поперечного сечения).

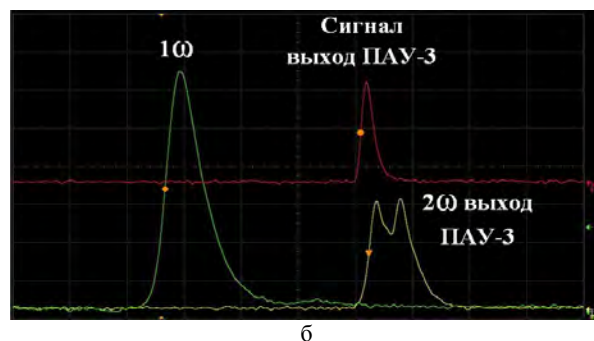
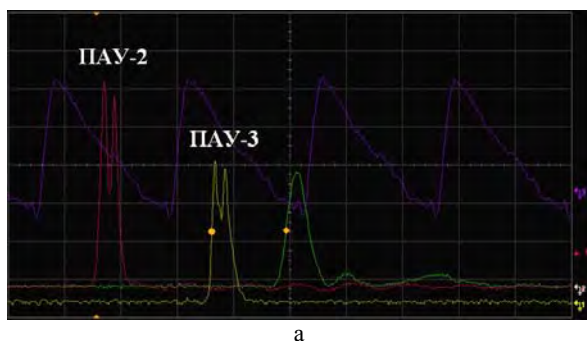


Рис. 3. Осциллограммы лазерных импульсов накачки на выходе усилителей ПАУ-2 и ПАУ-3: а – в штатной схеме регистрации; б – в схеме точной временной синхронизации

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

Результаты произведенных вычислений представлены черными кривыми на рис. 4. Из рис. 4 видно, что интервал заданный 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 рис. 4 точками отмечены экспериментальные данные. Отметим, что на график были помещены только те значения энергии, которые зарегистрированы в опытах с временной рассинхронизацией импульсов накачки и сигнала $\Delta t \leq 0,1$ нс. Незначительный разброс экспериментальных точек обусловлен нестабильностью работы данной лазерной системы.

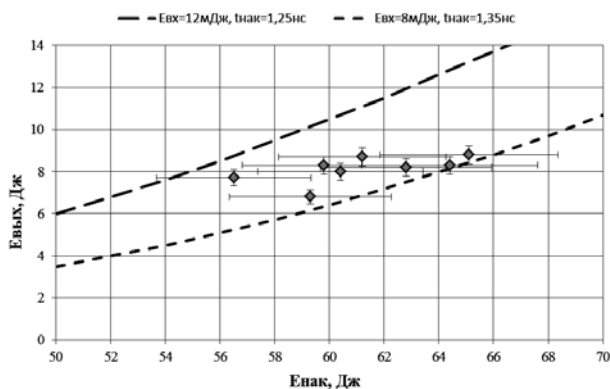


Рис. 4. Зависимость энергии усиленного чирп-импульса на выходе ПАУ-3 от энергии излучения накачки

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает их соответствие с учетом погрешности.

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 9Дж.

2. Разработка и внедрение системы наведения и точной фокусировки скомпрессированного лазерного пучка на мишень

Оптическая схема заведения скомпрессированного лазерного импульса ($\lambda = 911$ нм; $\varnothing_{\text{пучка}} \approx 200$ мм) в мишенную камеру с системой наведения и фокусировки показана на рис. 5. Лазерный пучок после выхода из компрессора попадает на зеркала системы транспортировки лазерного пучка на мишень. Далее по узлу сопряжения пучок доставляется на внеосевую параболу с фокусным расстоянием 800 мм, которая производит его фокусировку на мишень.

Так как в проводимых ранее экспериментах по облучению мишеней различных типов [5] применяемое на установке оборудование не позволяло стабильно точно наводить пучок на мишень и стабильно получать минимальное пятно фокусировки излучения, в рамках данной работы проведена модернизация системы наведения и точной фокусировки, которая за-

ключалась в замене видео-камеры Watec-902H на более современную модель SP620U фирмы Spiricon и изменении оптико-механической части. Камера SP620U отличается вдвое меньшим размером пикселя (4,4 мкм), высоким динамическим диапазоном (64 дБ), удобным интерфейсом обмена данных с персональным компьютером. Эти особенности позволяют оперативно, в процессе юстировки, получать количественную информацию о форме и размере пятна фокусировки. Типичное изображение пятна фокусировки и его обработка приведены на рис. 6. Изображение пятна фокусировки регистрировалось в непрерывном юстировочном излучении на рабочей длине волны 911 нм.

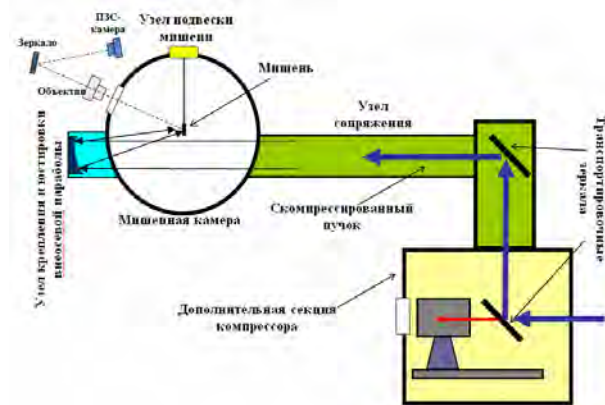


Рис. 5. Оптическая схема заведения скомпрессированного лазерного импульса в мишенную камеру с системой наведения и фокусировки

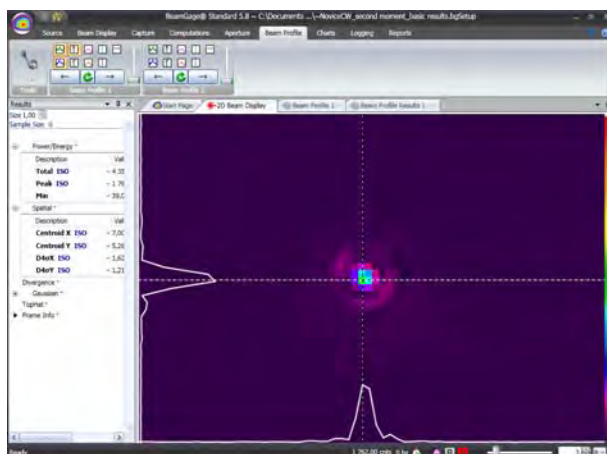


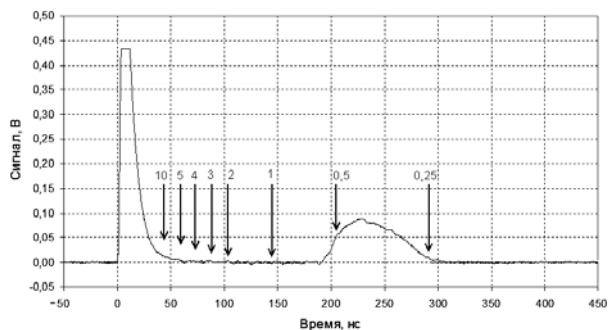
Рис. 6. Пятно фокусировки в программном обеспечении Beam Gage Standard

Видно, что разрешаются пиксели камеры, размер которых $4,4 \times 4,4$ мкм, что свидетельствует о высоком пространственном разрешении системы наведения и точной фокусировки. Диаметр пятна фокусировки по уровню $0,5 I_{\text{max}} \approx 11$ мкм.

Диаметр пятна фокусировки в экспериментах по облучению мишеней составлял $\varnothing \approx$ от 8 до 60 мкм. Нестабильность была обусловлена трудностью точного продольного наведения лазерного пучка на мишень.

3. Времяпролетная методика регистрации протонов с энергией до 10 МэВ

Времяпролетный метод часто применяется для измерения кинетической энергии частиц. В экспериментах генерация частиц сопровождается рентгеновским излучением. Поэтому измерять энергетический спектр ионов времяпролетным методом можно, используя один детектор с подходящим временным разрешением [9, 10]. Детектор, находящийся от источника излучения, сначала регистрирует рентгеновское излучение, и, только потом частицы с уменьшающейся энергией в соответствии с рис. 7. Стрелки указывают время прилета протона с соответствующей этому времени энергией частицы, указанной над стрелкой [МэВ] при пролетной базе 2 м. Максимальная энергия протонов оценивается по положению переднего фронта протонного пика. В качестве детекторов применялись фотодиоды ФДУК-8УВ площадью 8 мм² и толщиной чувствительного слоя кремния не менее 350 мкм, что соответствует полному пробегу протонов с энергией ≈ 10 МэВ. Временное разрешение детекторов составляло в разных каналах 3 нс. Временное разрешение измерительных каналов в целом, с учетом влияния кабеля и других элементов схемы регистрации, составляло 3,5 нс. Для защиты от инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра излучения использовались фильтры из алюминия толщиной 8 мкм, которые полностью поглощают протоны с энергией меньше $\sim 0,6$ МэВ. Принципиальная схема измерительного канала показана на рис. 8.



В проведенных экспериментах облучению подвергались тонкие металлические мишени из титана толщиной 1 мкм и золота толщиной 1,5 мкм. Получены осциллограммы, отражающие изменение во времени напряжения на выходе детектора, соответствующее изменению величины электрического заряда, генерируемого в детекторе от ионизирующего излучения. Во всех опытах частота оцифровки сигнала была установлена равной 1,25 ГГц, т. е. $\Delta t = 0,8$ нс.

На рис. 9 приведена осциллограмма, показывающая регистрацию самых быстрых протонов за всю проведенную серию экспериментов, где первый пик (по времени) соответствует приходу на детектор рентгеновского излучения, второй пик - ускоренных протонов и ионов. Пролетная база во всей серии опытов составила 184 см.

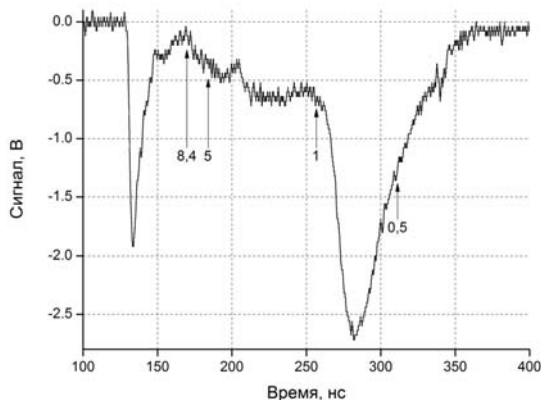


Рис. 9. Осциллограмма с самыми быстрыми протонами за серию 3.11.15/1 $\sim 8,4$ МэВ

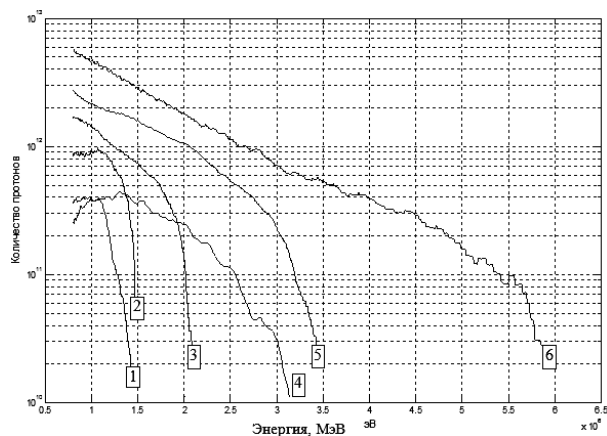


Рис. 7. Характерная осциллограмма времяпролетной методики

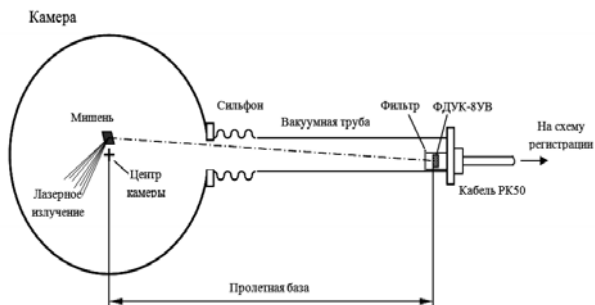


Рис. 10. Спектры протонов, излучаемых с тыльной стороны некоторых мишеней: 1 – Au, 29.10.15/1; 2 – Ti, 30.10.15/1; 3 – Au, 28.10.15/4; 4 – Ti, 3.11.15/2; 5 – Au, 29.10.15/2; 6 – Ti 30.10.15/3

Рис. 8. Принципиальная схема времяпролетного измерительного канала.

Спектры протонов в подавляющем числе случаев имеют достаточно гладкий вид, без ярких особенностей, экспоненциально спадающие с энергией. Верхняя граница в протонных спектрах достаточно четко выражена – спектр характеризуется довольно резкой «отсечкой» по максимальной энергии. Значение верхней границы энергии отражает эффективную величину

ускоряющего поля, реализовавшегося в данном конкретном эксперименте, и является важной характеристикой режима ускорения. Характерный вид спектра протонов для некоторых мишеней представлен на рис. 10.

Видно, что спектры, несмотря на отмеченные выше общие черты, достаточно сильно отличаются по жесткости и максимальной энергии.

4. Методика регистрации электронов с энергией ≤ 1 МэВ

Наиболее простым и эффективным методом подобных измерений является известный в ядерной физике метод разделения заряженных частиц в постоянном магнитном поле [11]. Для регистрации спектра электронов применялся спектрометр СЭ-15/1000, схема которого приведена на рис. 11. Данная аппаратура способна регистрировать электроны в диапазоне энергий до 1 МэВ. Пучок электронов, пройдя через входные щели 1 шириной 2 мм и 7 шириной 30 мкм, попадает область постоянного магнитного поля $B \sim 0,5$ Тл, которое создается с помощью постоянного магнита 5 из сплава NdFeB, расположенного на расстоянии 5 мм от имитатора из магнитомягкой стали. Комбинация магнит - имитатор используется для достижения необходимой магнитной индукции $\approx 0,5$ Тл. За счет щелевой диафрагмы, телесный угол регистрации спектрометра СЭ-15/1000 составляет 0,126 ср во всем диапазоне энергий. В качестве детектора 3 используется рентгеновская пленка УФ-4 без защитного желатинового слоя. Детектор находится в кассете 2 и защищен от видимого излучения фильтром, который представляет собой лавсановую пленку толщиной 3,5 мкм с напыленным слоем алюминия толщиной $\sim 0,1$ мкм. Данным фильтром определяется нижняя граница регистрации электронов по энергии приблизительно от 15 до 20 кэВ (или $1,5 \times 10^5$ электронов одинаковой энергии на входную щель).

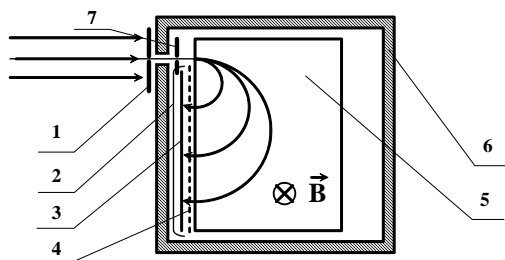


Рис. 11. Схема спектрометра электронов СЭ-15/1000: 1 – входная щелевая диафрагма, 2 – кассета, 3 – детектор, 4 – фильтр, 5 – магнит, 6 – корпус, 7 – вторая щелевая диафрагма

Известно [12], что для малых входных углов при отклонении в постоянном однородном магнитном поле на 180° моноэнергетичный пучок электронов обладает способностью самофокусировки, то есть относительная погрешность регистрации энергии электронов зависит, как показано на рис. 12, от величины входного угла $\Delta\alpha = (1 - \cos\alpha)$, где α – входной угол. Так для конфигурации входных щелей, представленных на рис. 1, $\alpha = \pm 11,5^\circ$ и $\Delta\alpha = 2\%$. Следовательно, разрешающая способность спектрометра зависит только от ширины входной щели и для данного прибора составляет от 15% при $E_e = 50$ кэВ до 3% при $E_e = 1$ МэВ.

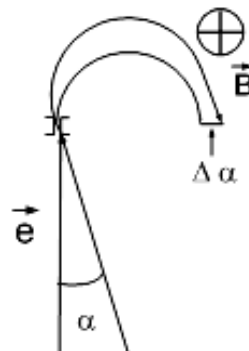


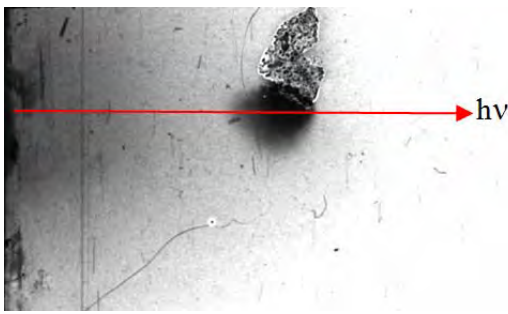
Рис. 12. Разрешающая способность спектрометра для моноэнергетичной линии в зависимости от направления влета электрона в спектрометр

На рис. 13 приведены фотография пленки спектрометра и типичные спектры электронов.

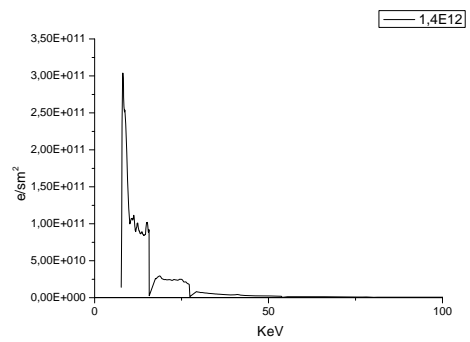
На фото пленки (рис. 13,а) видно разрушение чувствительного слоя пучком электронов. Пропись по неповрежденной части пленки показала, что в спектре электронов имеется высокоэнергетичная группа со средней энергией $E_e \approx 0,5$ МэВ.

5. Методика регистрации рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов до 10 МэВ в сплошном спектре

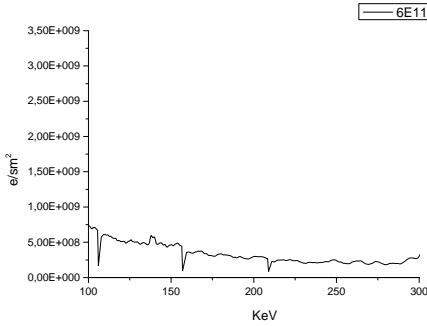
Одной из целей проведения опытов на установке «Фемто» было получение источника жесткого рентгеновского излучения (РИ) до 10 МэВ для целей радиологии. Исследовался выход рентгеновского излучения с энергией квантов до 10 МэВ и оценивалась его длительность.



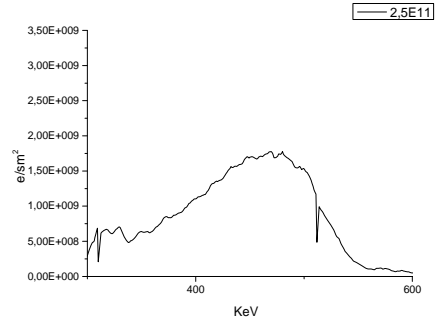
а



б



в



г

Рис. 13. Фотография пленки спектрометра и спектры электронов в разных диапазонах энергий квантов: а – фотография, б – до 100 кэВ, в – до 300 кэВ, г – до 600 кэВ

Для диагностики потоков РИ и параметров плазмы в экспериментах использовалась методика измерений, основанная на применении сцинтилляционных детекторов [10]. В качестве детекторов выступали 2 сцинтилляционных датчика марок ССДИ8М и ТСДИ45. Схема постановки аппаратуры регистрации РИ представлена на рис. 14.

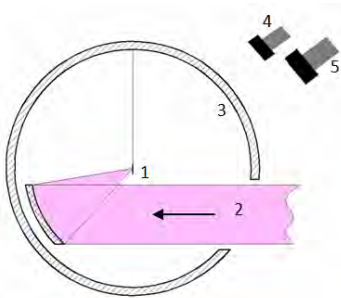


Рис. 14. Схема размещения регистрации РИ в сплошном спектре: 1 – мишень; 2 – ЛИ; 3 – мишенная камера установки «Луч»; 4 – сцинтилляционный детектор ТСДИ45; 5 – сцинтилляционный детектор ССДИ8М

Регистрация жесткого РИ осуществлялась с помощью 2-х сцинтилляционных детекторов 4 и 5. Детектор 5 марки СНФТ8М-01 (ССДИ8М) с пластиковым сцинтиллятором марки Б-18 размером $\varnothing 40 \times 90$ мм. Детектор был расположен с тыльной стороны мишени на оси лазерного излучения на расстоянии ≈ 1200 мм от мишени. Временное разрешение при этом составило $\delta t = 8$ нс. Детектор прокалиброван с помощью импульсного рентгеновского источника

«МИРА-2Д» относительно ранее калиброванных детекторов ССДИ38-01, используемых в экспериментах на установке «Искра-5». Чувствительность детектора на 1 МэВ поглощенной в сцинтиляторе энергии составила $\sim 2 \times 10^{-13}$ Кл/МэВ (погл.). Детектор 4 марки ТСДИ45-01 со сцинтилятором BaF_2 размерами $\varnothing 25 \times 20$ мм. Детектор был расположен с тыльной стороны на оси лазерного излучения на расстоянии ≈ 850 мм от мишени. Временное разрешение при этом составило $\delta t = 2$ нс. Детектор прокалиброван с помощью импульсного рентгеновского источника «МИРА-2Д» относительно ранее калиброванного детектора ССДИ8М. Чувствительность детектора на 1 МэВ поглощенной в сцинтиляторе энергии составила $\sim 1 \times 10^{-16}$ Кл/МэВ (погл.).

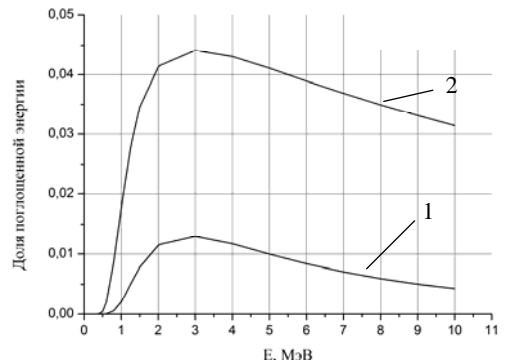
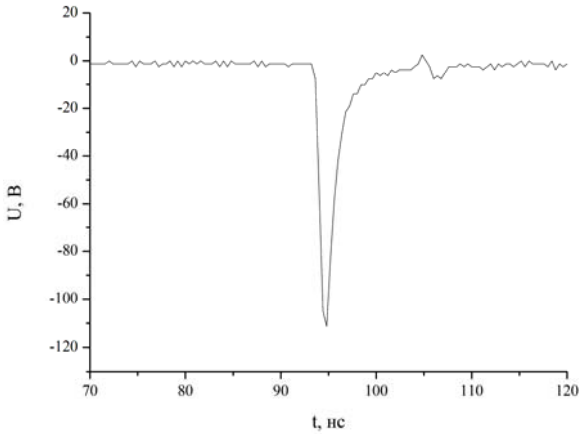


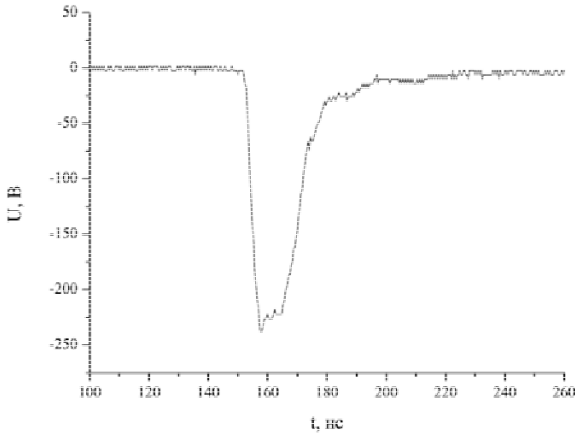
Рис. 15. Доля поглощенной энергии гамма кванта в сцинтилляторах детекторов, с учетом свинцовых фильтров, в зависимости от его энергии: 1 – ССДИ8М, 2 – ТСДИ45

В качестве спектрального фильтра для РИ, отсекающего низкоэнергетичные фотоны, использовались свинцовые фильтры. На рис. 15 представлена спектральная чувствительность обоих детекторов с учетом свинцовых фильтров для ССДИ8М 70мм, для ТСДИ45 40 мм. Из приведенного графика чувствительности видно, что оба сцинтилляционных детектора регистрировали гамма-кванты от 1 МэВ и выше.

На рис.16 представлены типичные осциллограммы, зарегистрированные обоими детекторами в проведенных экспериментах. Детекторы находились на оси падения ЛИ на мишень, с тыльной стороны мишени. ТСДИ45 был установлен на расстоянии 20 см, а ССДИ8М 50 см, от стенки камеры взаимодействия. Толщина свинцовых фильтров на первом детекторе составляла 40 мм и 70 мм на втором.



а



б

Рис. 16. Результаты регистрации жесткого РИ детекторами: а – ФЭУ ТСДИ45 (ВаF₂), б – ФЭУ ССДИ8М (Б-18)

В некоторых экспериментах на осциллограммах жесткого РИ наблюдался «зашкал» амплитуды импульсов. При постановке свинцовых фильтров толщиной 40 мм ТСДИ45 и 70 мм ССДИ8М с учетом спектральной чувствительности каналов регистрации зарегистрированы импульсы жесткого РИ с энергией квантов ≥ 1 МэВ.

На фемтосекундном канале лазерной установки «Луч» проведены эксперименты по облучению плоских металлических мишеней при интенсивностях лазерного пучка $\sim 10^{20}$ Вт/см² с целью исследования возможности генерации потоков высокоэнергетичных заряженных частиц и жесткого рентгеновского излучения (РИ). Достижение требуемого уровня интенсивности излучения потребовало модернизации системы накачки параметрического усилителя ПАУ-3, а также разработки методик и аппаратуры измерений параметров корпускулярного и электромагнитного излучений лазерной плазмы.

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 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 от 55 до 65 Дж при длительности лазерного импульса 1,3 нс. Интенсивность пучка накачки ПАУ-3 составляла 1,3 ГВт/см².

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 10^{20} Вт/см².

5. Разработаны методики и аппаратура диагностики параметров лазерной плазмы, задействованные в экспериментах по облучению тонких металлических мишеней:

- электронный спектрометр СЭ-15/1000;
- датчики жесткого РИ на базе фотоэлектронных умножителей ТСДИ45 (сцинтиллятор ВаF₂) и ССДИ8М (сцинтиллятор Б-18);
- времяпролетный спектрометр протонов на базе кремниевого полупроводникового фотодиода ФДУК-8УВ.

6. В результате проведенных работ были проведены успешные опыты по облучению тонких металлических мишеней, в которых получены высокоэнергетичные пучки электронов ($E_e \approx 0,5$ МэВ), протонов ($E_p \approx 10$ МэВ) и жесткого рентгеновского излучения (энергия квантов ≥ 1 МэВ).

Литература

1. Крюков П. Г. Фемтосекундные импульсы. – М.: Физматлит, 2008.
2. Фортов В. Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. УФН, 2009. Т. 179, № 6, С.653–687.
3. Коржиманов А. В., Гносков А. А., Хазанов Е. А., Сергеев А. М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов. УФН, 2011. Т. 181, № 1, С. 9–32.
4. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии. // УФН, 2011. Т. 181, № 4, С. 434–441.
5. Belkov S. A., Garanin S. G., Rukavishnikov N. N. RFNC-VNIIEF study into interaction between intense laser pulses and substance. Contributions to Plasma Physics, V. 53, Issue 2, Pp.122–128 (2013).
6. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И., Кириллов Г. А., Кочемасов Г. Г., Курунов Р. Ф. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс. Квантовая электроника 35, № 4, 2005 г., С. 299–301.
7. Епатко И. В., Малютин А. А., Серов Р. В., Соловьев Д. А., Чулкин А. Д. Новый алгоритм численного моделирования распространения лазерного излучения. Квантовая электроника, Т. 25, № 8, С. 717–722 (1998).
8. 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, Pp.125–133.
9. Борщевский А. В. Разработка на основе быстрых полупроводниковых детекторов методики измерения диаграммы направленности и спектра потоков быстрых ионов (протонов) в экспериментах по изучению взаимодействия сверхмощного лазерного излучения с веществом. Сборник докладов Международной конференции 18 Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии, 2016.
10. Абрамов А. И. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Атомиздат. 1977. Гл. 7, 13.
11. Thomson J. J. Phil. Mag. [6] 21, 225 (1911).
12. Савельев И. В. Курс общей физики, Т. 1. – М.: Наука. 1982. С. 432.