

УДК 621.373.826; 533.9

Исследования взаимодействия интенсивных лазерных импульсов с веществом в РФЯЦ-ВНИИЭФ

С. А. Бельков, С. Г. Гаранин,
Н. Н. Рукавишников

Представлены описания и принципы работы действующих в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ лазеров со сверхкороткой длительностью импульса излучения: тераваттной установки ($E \approx 1,5$ Дж; $\tau \approx 0,7$ пс) и лазерной системы петаваттного уровня мощности ($E \approx 50$ – 70 Дж; $\tau \approx 45$ – 70 фс) на основе параметрического усиления широкополосного chirпированного лазерного импульса. Приведены результаты измерений изображения мишени в собственном рентгеновском излучении; спектра электронов и протонов в постановочных экспериментах по облучению тонкопленочных мишеней из различных материалов при интенсивности лазерного пучка $I_{\text{миш}} \sim 10^{19}$ Вт/см²; расчетно-теоретических исследований воздействия лазерного импульса длительностью 50–100 фс и интенсивностью от $1 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{21}$ Вт/см² на твердотельные мишени различного состава и конструкции, выполненных с помощью численных PIC-кодов PLASMA-2 и КАРАТ.

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в разработке и создании твердотельных 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. 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 [1–5]).

В РФЯЦ-ВНИИЭФ действуют две лазерные установки с ультракороткой длительностью импульса излучения. Первая лазерная система действует на традиционном принципе усиления chirпированного лазерного импульса в квантовых усилителях на неодимовом фосфатном стекле и имеет выходную мощность до 2 ТВт ($E \approx 1,5$ Дж; $\tau \approx 0,7$ пс) [6]. Фокусировка лазерного пучка на мишень осуществляется внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 40 см. Интенсивность лазерного излучения на мишени $I \sim 10^{16}$ Вт/см². Установка предназначена для разработки методик и аппаратуры измерений параметров лазерной плазмы.

Принцип построения второй лазерной системы (петаваттного уровня мощности) отличается от традиционного и основан на использовании параметрических усилителей света вместо обычных лазерных [7–10]. В этой схеме наряду с традиционными для генерации сверхсильных полей

принципами временного растяжения и компрессии усиленных импульсов используется принцип многокаскадного параметрического усиления в нелинейных кристаллах DKDP. Выбор этих кристаллов обусловлен тем обстоятельством, что при выполнении условий сверхширокополосного синхронизма максимальная ширина полосы усиления сигнала в кристалле DKDP при интенсивности излучения накачки $I_{\text{нак}} \sim 1\text{--}4 \text{ ГВт/см}^2$ составляет $2300\text{--}2500 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda_0 \approx 910 \text{ нм}$, $\Delta\lambda \approx 200 \text{ нм}$), что позволяет усиливать импульсы длительностью $\approx 15 \text{ фс}$ [9, 10]. При этом накачка параметрических усилителей может производиться излучением лазера на неодимовом стекле, преобразованном во вторую гармонику ($\lambda_{1\omega} = 1054 \text{ нм}$, $\lambda_{\text{нак}} = \lambda_{2\omega} = 527 \text{ нм}$), т. е. данная схема усиления chirпированного импульса может быть встроена в действующую в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерную установку на неодимовом фосфатном стекле «Луч» [11]. Канал этой установки используется для накачки выходного параметрического усилителя, обеспечивающего энергию chirпированного импульса на входе в компрессор $E_{\text{чирп}} \approx 110 \text{ Дж}$ на длине волны 910 нм . Кроме того, преимуществами схемы параметрического усиления, по сравнению с традиционной, являются меньшие размеры дифракционных решеток компрессора, а также возможность получения высокого ($\geq 10^9$) контраста петаваттных импульсов.

Структурная схема лазерной части установки [12] приведена на рис. 1. Она состоит из следующих основных систем:

- стартовой системы, в которой происходит генерация ультракороткого ($\tau \sim 50 \text{ фс}$) лазерного импульса, растяжение его в стретчере до $\tau \approx 1 \text{ нс}$ и усиление в предварительных каскадах параметрического усиления ПАУ-1 и ПАУ-2 [12, 13]. Импульс излучения с выхода стартовой системы с энергией $E_{\text{вых1}} \approx 50\text{--}100 \text{ мДж}$ и частотой следования 2 Гц может быть скомпрессирован до мощности $P_{\text{вых1}} \approx 0,5 \text{ ТВт}$. 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 $E_{\text{вых2}} \approx 10\text{--}15 \text{ Дж}$, что после компрессии дает выходную мощность лазерного пучка $P_{\text{вых2}} \approx 100\text{--}200 \text{ ТВт}$ [14, 15];

- петаваттной системы, обеспечивающей параметрическое усиление chirпированного импульса с выхода предыдущей системы до энергии $E_{\text{вых3}} \approx 100 \text{ Дж}$, что после компрессии дает выходную мощность лазерного пучка $P_{\text{вых3}} \approx 1 \text{ ПВт}$ ($E_{\text{вых}} \approx 50\text{--}70 \text{ Дж}$; $\tau_{\text{имп}} \approx 50\text{--}70 \text{ фс}$) [16].

На рис. 2 показаны выходной параметрический усилитель ПАУ-4 и преобразователь лазерного излучения канала установки «Луч» во вторую гармонику. На рис. 3 приведена осциллограмма импульса накачки с выхода ПАУ-4, на которой хорошо видно «выедание» накачки при параметрическом усилении chirпированного лазерного импульса. При энергии импульса накачки $E_{\text{нак}} \approx 1 \text{ кДж}$, длительности $\tau_{\text{нак}} \approx 2,5 \text{ нс}$ и интенсивности $I_{\text{нак}} \approx 1 \text{ ГВт/см}^2$ на выходе параметрического усилителя ПАУ-4 была получена энергия $E_{\text{чирп}} \approx 110 \text{ Дж}$ (рис. 4). Полный коэффициент параметрического усиления во всей системе составляет $\sim 10^{11}$.

Компрессор петаваттных лазерных импульсов сконструирован по однопроводной схеме на основе четырех дифракционных решеток с золотым покрытием [17], каждая размером $240 \times 380 \text{ мм}$ с плотностью штрихов 1200 мм^{-1} . На рис. 5 показана экспериментальная зависимость мощности скомпрессированного излучения в зависимости от энергии накачки выходного параметрического усилителя ПАУ-4.

На рис. 6 показан общий вид компрессора и мишенной камеры.

Фокусировка скомпрессированного лазерного пучка на мишень осуществляется внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 80 см с собственным кружком рассеяния $\approx 9 \text{ мкм}$ ($\lambda = 0,9 \text{ мкм}$; $\varnothing_{\text{пучка}} = 18 \text{ см}$). Диаметр пучка при фокусировке составляет $D_{\text{фок}} \approx 22 \text{ мкм}$.

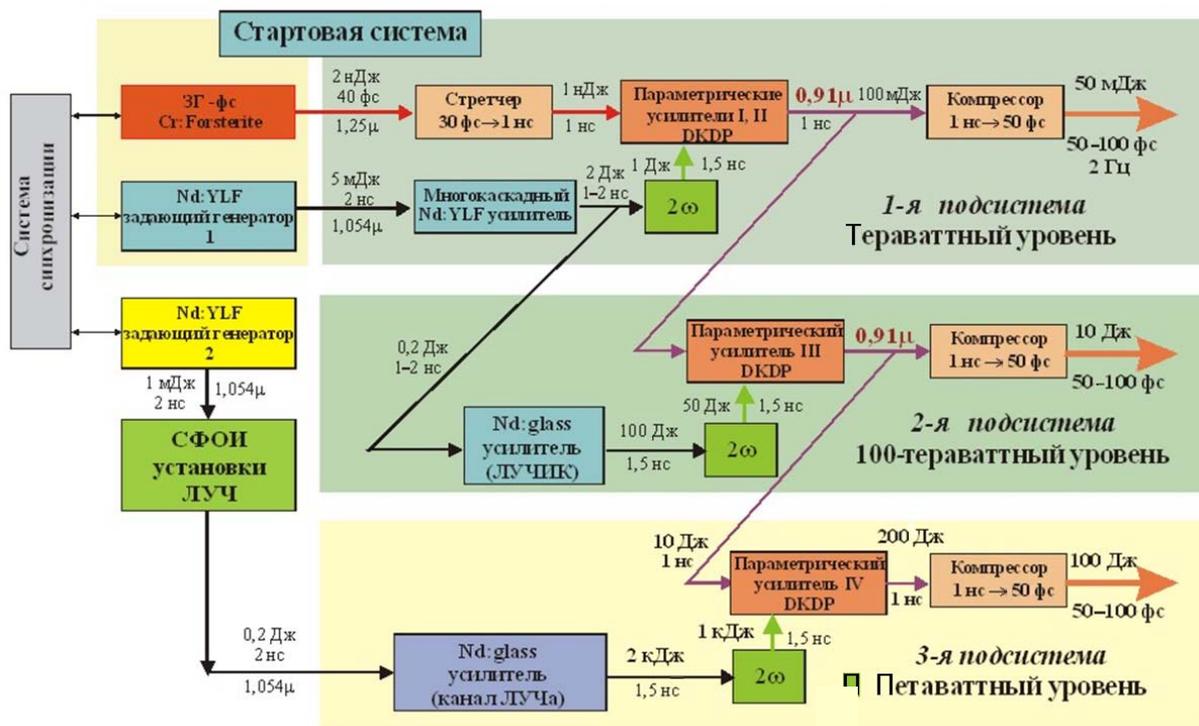


Рис. 1. Структурная схема лазерной части установки

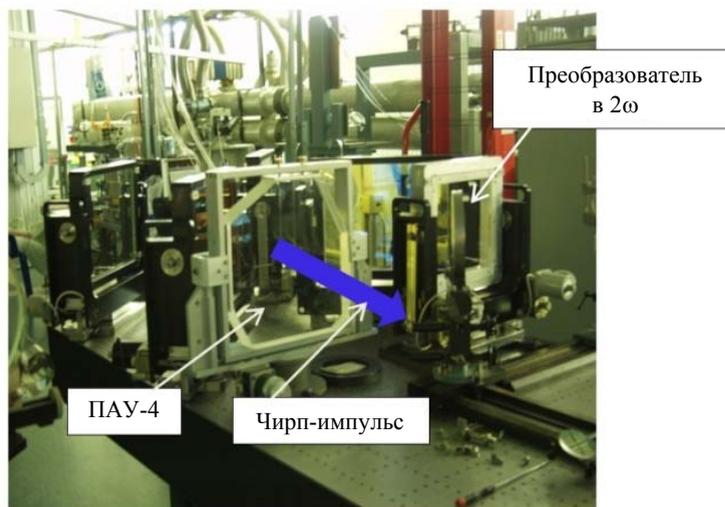


Рис. 2. Выходной параметрический усилитель ПАУ-4 и преобразователь лазерного излучения канала установки «Луч» во вторую гармонику

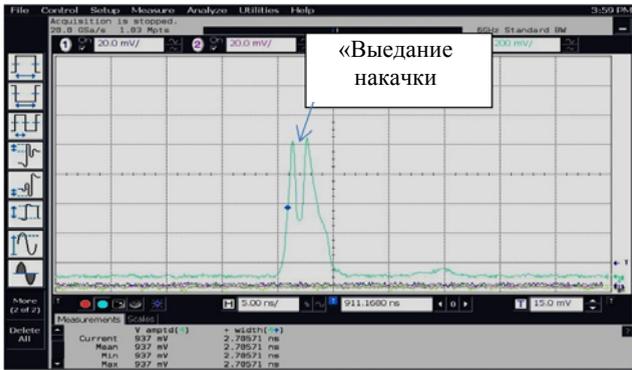


Рис. 3. Осциллограмма импульса накачки с выхода ПАУ-4

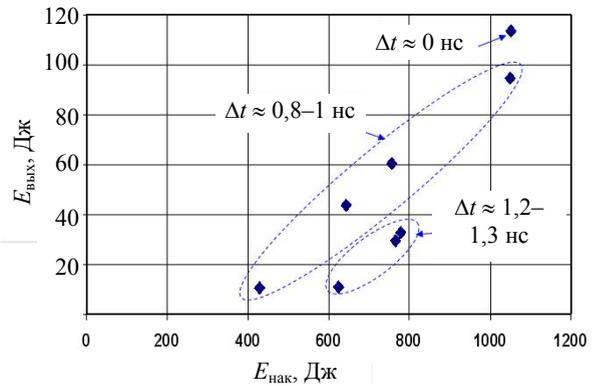


Рис. 4. Экспериментальная зависимость энергии параметрически усиленного chirпированного импульса на выходе ПАУ-4 от энергии накачки. Δt – разновременность импульсов накачки и сигнала на входе ПАУ-4

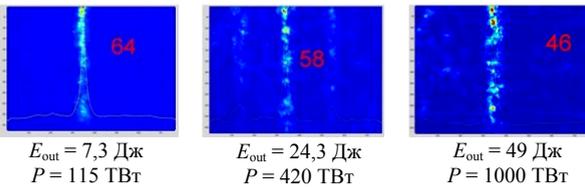
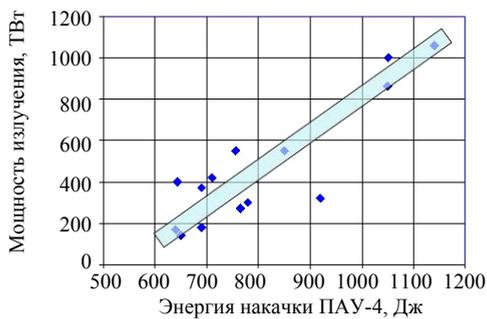


Рис. 5. Экспериментальная зависимость мощности скомпрессированного излучения в зависимости от энергии накачки выходного параметрического усилителя ПАУ-4



Рис. 6. Фото компрессора и мишениной камеры

На петаваттном лазерном комплексе установки «Луч» были проведены эксперименты по облучению плоских тонких (1–30 мкм) мишеней (Cu, Al, Au, Ti, лавсан, ППК) при интенсивности лазерного излучения $I_{миш} \sim 10^{19}$ Вт/см². Целью экспериментов являлась отработка методик проведения облучательных опытов и диагностики параметров лазерной плазмы. Были задействованы следующие методики измерений:

– камера-обскура, дающая изображение лазерной плазмы в собственном рентгеновском излучении в диапазоне энергий квантов 0,3–5 кэВ;

- спектрометр электронов (диапазон регистрации 15–1500 кэВ);
- методика измерений пространственного и энергетического распределения протонов на основе трекового детектора CR-39 (диапазон регистрации 0,1–10 МэВ);
- времяпролетная методика измерения спектра протонов (диапазон регистрации 0,2–2 МэВ).

Типичное изображение лазерной плазмы в собственном рентгеновском излучении показано на рис. 7. Диаметр изображения по уровню 0,5 составляет ≈ 15 мкм.

На рис. 8 показан типичный спектр электронов, полученный при облучении медной мишени толщиной 3 мкм при интенсивности $I \approx 10^{19}$ Вт/см². Спектр имеет двухтемпературный характер с температурами $T_{e1} \approx 12$ кэВ и $T_{e2} \approx 250$ кэВ.

На рис. 9 приведен спектр протонов, полученный с помощью трековых детекторов CR-39 при облучении титановой мишени толщиной 1 мкм при угле падения 45°. Максимальная энергия протонов 2–2,5 МэВ достигается с тыльной стороны мишени.

Типичные спектры протонов, зарегистрированные с помощью времяпролетной методики, показаны на рис. 10. Максимальная энергия протонов также зарегистрирована с тыльной стороны мишени и составляет 1,5–1,8 МэВ.

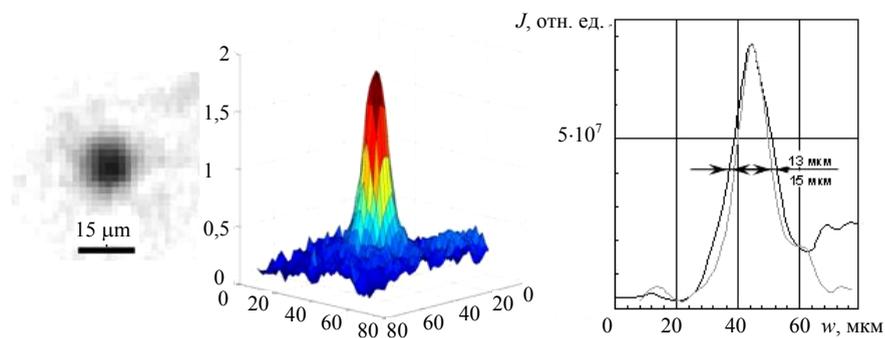


Рис. 7. Типичное изображение лазерной плазмы в собственном рентгеновском излучении

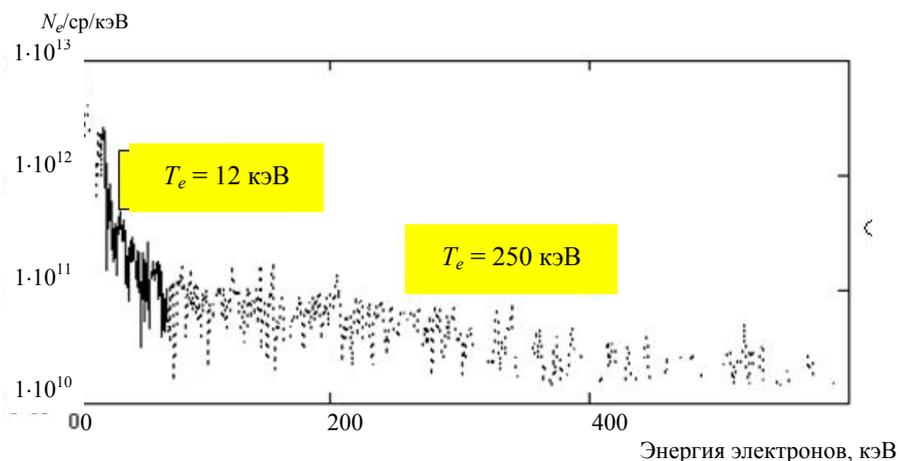


Рис. 8. Спектр электронов при облучении медной мишени толщиной 3 мкм при интенсивности $I \approx 10^{19}$ Вт/см²

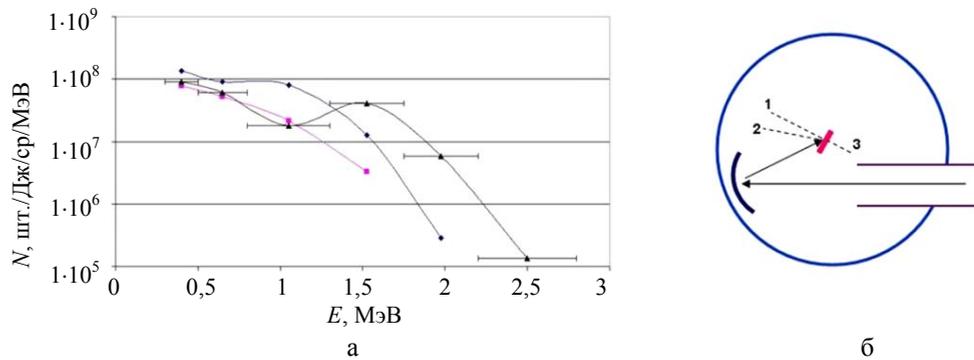


Рис. 9. Спектр протонов, полученный с помощью трековых детекторов CR-39 при облучении титановой мишени толщиной 1 мкм при угле падения 45° (а) и расположение датчиков (б), $I \approx 10^{19}$ Вт/см 2 : 1 – 45° ; 2 – 30° ; 3 – -135°

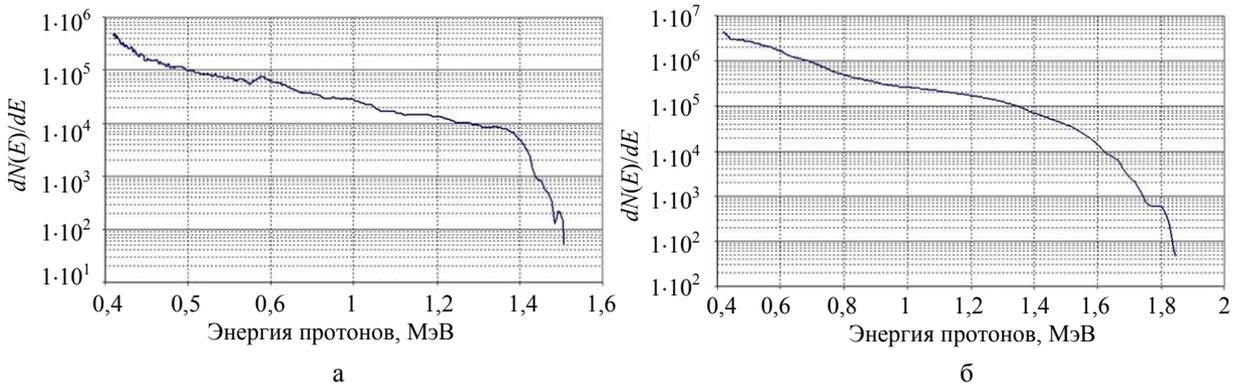


Рис. 10. Спектры протонов, зарегистрированные с помощью времяпролетной методики при $I \approx 8 \cdot 10^{18}$ Вт/см 2 : а – медная мишень 3 мкм, облучение по нормали, датчик с тыльной стороны под углом 25° к нормали; б – титановая мишень 1 мкм, облучение под углом 45° , датчик с тыльной стороны по нормали к мишени

Проводились расчетно-теоретические исследования воздействия лазерного излучения длительностью 50–100 фс и интенсивностью от $1 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{21}$ Вт/см 2 на твердотельные мишени различного состава и конструкции. При расчетном моделировании использовались два полностью релятивистских двумерных (2D3V) PIC-кода PLASMA-2 и KAPAT. Код PLASMA-2 – разработка ВНИИЭФ, KAPAT – разработка ИОФРАН [18–20].

Код PLASMA-2 позволяет получать более детальную информацию о спектрах частиц и их энергиях. Код KAPAT учитывает некоторые столкновительные процессы (расчет выхода гамма-излучения, полевую ионизацию, DD-реакции) и обладает развитым графическим интерфейсом, что дает возможность получать наглядное представление о происходящих в расчетной области процессах. Численное моделирование проводилось в расчетной области с типичным размером 40×40 мкм 2 и числом узлов ≈ 10 млн. Количество макрочастиц также ≈ 10 млн.

Результаты численного моделирования в условиях, близких к экспериментальным (рис. 11), показало, что граничная энергия протонов удовлетворительно описывается расчетными кривыми только для лавсана и в отдельных опытах – для титана. Другие экспериментальные значения отличаются от расчетных примерно в два раза. При интенсивности меньше $2 \cdot 10^{18}$ Вт/см 2 расчетные кривые проходят ниже экспериментальных точек, а при интенсивности больше

$6 \cdot 10^{18}$ Вт/см² – выше. Согласие с экспериментом наблюдается в диапазоне интенсивностей от $3 \cdot 10^{18}$ до $6 \cdot 10^{18}$ Вт/см². Возможной причиной более низких значений максимальной энергии протонов по сравнению с PIC-расчетами может быть прогрев мишени предимпульсом [21], который в данных экспериментах не контролировался.

На рис. 12 показан расчетный спектр электронов на момент времени ≈ 100 фс, когда действие лазерного импульса еще не закончилось. В диапазоне энергий меньше 100 кэВ электронные спектры согласуются между собой. При энергии от ≈ 300 до 500 кэВ расчетный спектр проходит значительно ниже экспериментального, возможно, потому, что расчетный спектр приведен для одного определенного момента времени, а экспериментальный спектр был интегральным для всей серии опытов на алюминии.

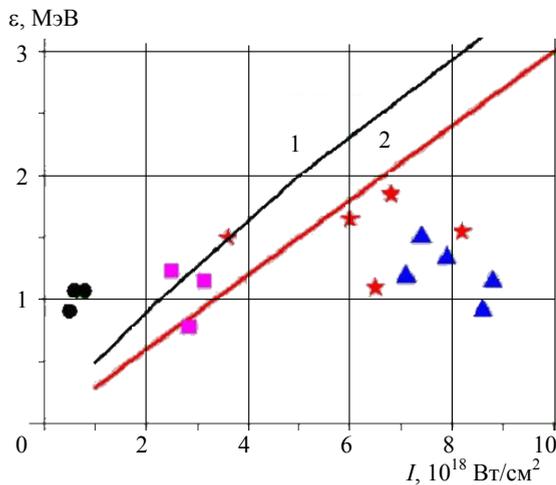


Рис. 11. Максимальная энергия протонов в эксперименте и расчетах: 1 – расчет PIC-код KARAT; 2 – расчет PIC-код PLASMA-2:
 ▲ – Cu; ★ – Ti; ■ – лавсан; ● – Al

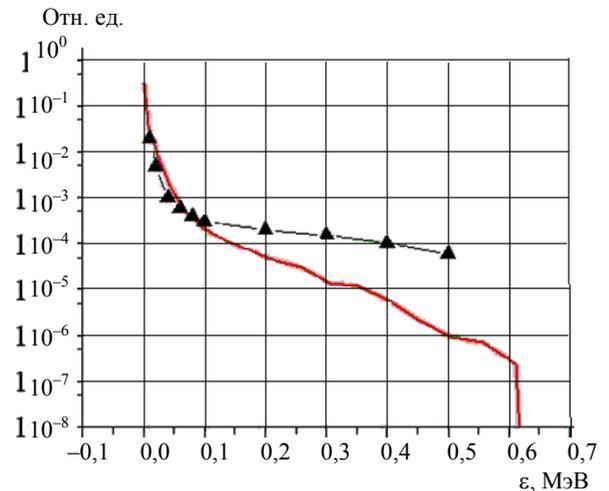


Рис. 12. Сравнение спектров электронов, полученных в расчете и эксперименте при облучении алюминиевой мишени толщиной 1 мкм: — — PIC-код, $2 \cdot 10^{18}$ Вт/см², $t = 103$ фс; ▲ – эксперимент, $0,5 \cdot 10^{18}$ Вт/см²

На рис. 13 (см. также цвет. вкладку) представлены результаты расчета при помощи двумерного PIC-кода PLASMA-2 энергетического спектра ионов C^{6+} в тонких мишенях, обусловленного световым давлением лазерного излучения. Длительность лазерного импульса бралась равной 80 фс, интенсивность – $4,8 \cdot 10^{20}$ Вт/см². Лазерное излучение имело круговую поляризацию. Плоская мишень имела плотность $0,7$ г/см³ и толщину 50 нм. Видно, что на момент 80 фс максимальная энергия ионов углерода составила примерно 450 МэВ (≈ 40 МэВ/нуклон), а средняя энергия – от 150 до 250 МэВ (от ≈ 10 до 20 МэВ/нуклон).

В настоящее время на этой установке идет подготовка к проведению облучательных экспериментов при интенсивности облучения $\sim 10^{20}$ Вт/см².

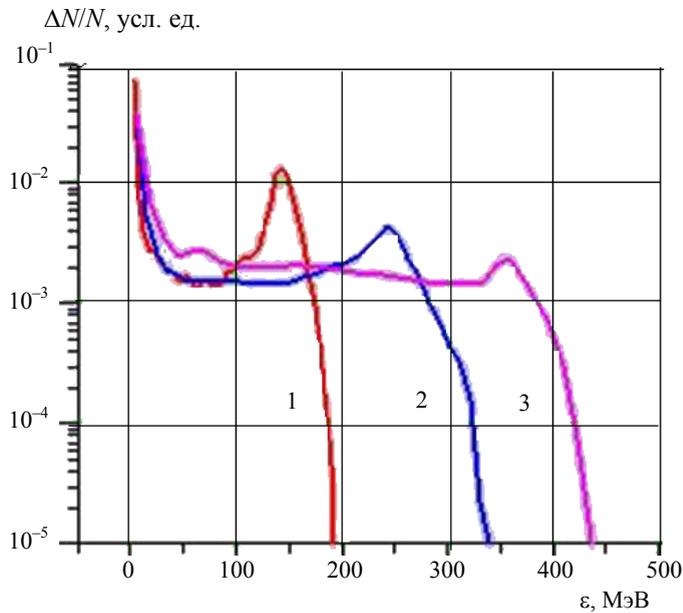


Рис. 13. Энергетический спектр ионов углерода в различные моменты времени:
1 – 54 фс, 2 – 69,5 фс, 3 – 81 фс

Список литературы

1. Летохов В. С. Фемтосекундные лазерные импульсы: перспективы и применения // Вест. РАН. 2002. Т. 72, № 9. С. 779–785.
2. Femtosecond technology for technical and medical applications. Topics in Applied Physics. – Springer, 2004. Vol. 96.
3. Багаев С. Н. Фемтосекундная лазерная физика // Усп. соврем. радиоэлектроники. 2004. № 5–6. С. 70–85.
4. Strong field laser physics: Series in optical sciences. – Springer, 2008. Vol. 134.
5. Коржиманов А. В., Гносков А. А., Хазанов Е. А., Сергеев А. М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // УФН. 2011. Т. 181, № 1. С. 9–32.
6. Гаранин С. Г., Зималин Б. Г., Романов В. В. и др. Нано- и субнаносекундные лазерные импульсы с управляемой временной формой и спектральным составом излучения // Оптич. журнал. 2010. Т. 77, № 10. С. 26–31.
7. Пискаркас А., Стабинис А., Янкаускас А. Фазовые явления в параметрических усилителях и генераторах сверхкоротких импульсов света // УФН. 1986. Т. 150. Вып. 1. С. 127–143.
8. Ross I. N., Matousek P., Towrie M. et al. The prospect for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers // Opt. Commun. 1997. Vol. 144. P. 125–133.

9. 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.
10. 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 // Conf. on Lasers and Electro-Optics, CLEO-2004, San Francisco, California. 16–21 May 2004.
11. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. 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.
12. 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 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 9. С. 210–223.
13. Freidman G., Andreev N., Bepalov V. et al. Sub-terawatt 70 fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals // XI Conf. on Laser Optics. St. Peterburg, 2003.
14. Ложкарев В. В., Гаранин С. Г., Герке Р. Р. и др. 100-тераваттный фемтосекундный лазер на основе параметрического усиления // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. Вып. 4. С. 196–199.
15. Lozhkarev V. V., Freidman G. I., Ginzburg V. N. et al. 200 TW 45fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification // Optics Express. 2006. Vol. 14, N 1. P. 446–454.
16. Shaykin A. A., Freidman G. I., Garanin S. G. et al. 1 petawatt OPCPA laser in Russia: status and expectations // Digest of the European conf. on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference. Munich, Germany, 14–19 June 2009.
17. Treacy E. B. Optical pulse compression with diffraction gratings // IEEE J. of Quan. Electronics. 1969. Vol. QE-5, N 9. P. 454–458.
18. Голубев А. И., Сысоева Т. Г., Якутов Б. П. Генерация ионов в тонких мишенях лазерными импульсами круговой поляризации // Сб. докл. междунар. конф. «XII Харитоновские тематические научные чтения "Проблемы физики высоких плотностей энергии"». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 369–374.
19. Tarakanov V. P. User's manual for Code KARAT. – VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc. 1992.
20. Андреев С. Н., Гаранин С. Г., Рухадзе А. А. и др. Моделирование эмиссии нейтронов при облучении мишеней из дейтерированного полиэтилена сверхинтенсивными лазерными импульсами // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 4. С. 377–381.
21. Andreev A. A., Sonobe R., Kawata S. et al. // Plasma Phys. and Control. Fusion. 2006. Vol. 48. P. 1605.

RFNC-VNIIEF Study into Interaction Between Intense Laser Pulses and Substance

S. A. Bel'kov, S. G. Garanin, N. N. Rukavishnikov

Descriptions and operation principals of working in RFNC-VNIIEF Institute of laser physics short-pulse terawatt laser facilities ($E \approx 1.5$ J; $\tau \approx 0,7$ ps) and based on parametrical amplification of chirped pulse petawatt system ($E \approx 50-70$ J; $\tau \approx 45-70$ fs) have been presented. The results of laser plasma image in self-X-ray-radiation, electron and proton spectrum in preliminary experiments with thin-film targets made of various materials at $I \sim 10^{19}$ W/cm² have been submitted. The results of calculations and theoretical study of laser irradiation effects at $I \sim 10^{18}-5 \cdot 10^{21}$ W/cm² with pulse duration 50–100 fs performed by numerical PIC-codes PLASMA-2 and KARAT have been presented.