

# КОНТРАСТ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА МУЛЬТИ-ТЕРАВАТТНОЙ ПИКОСЕКУНДНОЙ УСТАНОВКИ НА ФОСФАТНОМ НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ

Д. С. Гаврилов, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

В докладе представлены детальные характеристики контраста ультракороткого лазерного импульса мульти-тераваттной пикосекундной установки РФЯЦ-ВНИИТФ [1] на фосфатном неодимовом стекле. Измерения проведены во всех интересующих временных интервалах с разрешением до 250 фс с динамическим диапазоном, обеспечивающим уверенную регистрацию излучения, которое способно оказывать воздействие на мишень ( $10^6 \dots 10^{11}$ ).

## Введение

Характер взаимодействия ультракороткого лазерного импульса с веществом определяется его основными параметрами: энергией  $E$ , длительностью  $\tau_i$ , интенсивностью излучения на мишени  $I_M$ , контрастом  $K$ . Контраст характеризует уровень и структуру паразитного излучения, предшествующего рабочему импульсу, и для каждой мощной лазерной системы уникален. Зачастую именно данным обстоятельством обусловлено различие данных, получаемых на однотипных установках в аналогичных условиях эксперимента. Обеспечение высокого значения контраста и его контроль требуют проведения измерений в широком динамическом диапазоне ( $> 10^9$ ) при временном разрешении, сопоставимом с длительностью импульса,

что представляет собой сложную техническую задачу. Недостаток информации по данному параметру приводит, как минимум, к неправильной интерпретации полученных экспериментальных данных.

Требуемая величина контраста определяется поставленными задачами. В большинстве случаев необходимо, чтобы состояние мишени до прихода рабочего импульса оставалось невозмущенным. Степень воздействия паразитного излучения определяется как свойствами лазерной мишени, так и конкретным типом предимпульса. Например, при длительности предимпульса  $\tau \sim 1$  пс порог ионизации  $F_{II} \sim 6$  Дж/см<sup>2</sup> [3] соответствует пиковой интенсивности на мишени  $\sim 6 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. При рабочем значении  $I \geq 5 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>, которое достигается на установке [1], контраст по интенсивности

Таблица 1

	Тип предимпульса	Причина	Параметры установки	Воздействие на мишень	Метод измерения
1	«Длинный» пьедестал усиленного спонтанного излучения (УСИ)	Длительность накачки активной среды	$K_E \geq 2 \cdot 10^6$ $E_{УСИ} \leq 10$ мкДж в $\varnothing 134$ мкм, $\tau_{УСИ} \sim 600$ мкс	Нагрев поверхности Повреждение тонких фольг	Калориметр [2]
2	«Короткий» пьедестал УСИ ( $\leq 10$ нс)	Быстродействие оптических затворов	$K_{I2} \geq 3 \cdot 10^{13}$	Ионизация вещества (-)	P-i-n ФД (0,5 нс) + 1 ГГц осциллограф + плазменный затвор (ПЗ)
3	Ультракороткий предимпульс, $\Delta t \sim 12$ нс	Контраст оптических затворов	$K_{I3} \geq 2 \cdot 10^{11}$	Ионизация вещества (-)	Кросс-коррелятор; 1 пс стрик-камера + ПЗ.
4	Пьедестал рабочего ультракороткого импульса: $-100 \dots 0$ пс	Спектральные и фазовые искажения	$K_{I4} \geq 10^5$ (-20 пс) $K_{I4} \geq 10^8$ (-60 пс)	Ионизация вещества	Кросс-коррелятор; 1 пс стрик-камера + ПЗ.
5	Ультракороткие предимпульсы в интервале $-1000 \dots 0$ пс (~длительность чирпа)	Плоско-параллельные элементы в тракте	$K_{I5} \leq 2 \cdot 10^4$ (данный момент)	Ионизация вещества	1 пс стрик-камера + ПЗ.

ультракороткого предимпульса должен быть более  $10^7$ .

Основные типы предимпульсов, характерные для любых лазеров с усилением chirпированных импульсов, представлены на рис. 1 и перечислены в табл. 1.

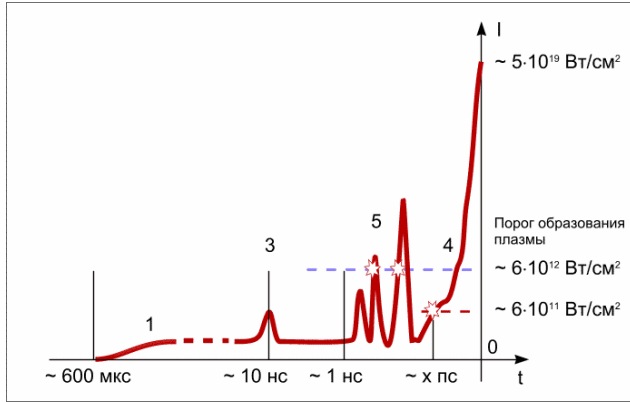


Рис. 1. Временная структура ультракороткого лазерного импульса

### 1. Протяженный пьедестал усиленного спонтанного излучения (УСИ)

Поверхности мишени достигает усиленное спонтанное излучение не изолированных затворами Поккельса выходных оптических квантовых усилителей (2 ОКУ  $\varnothing 85 \times 300$  мм и 1 ОКУ  $\varnothing 60 \times 300$  мм), попадающее в угловую апертуру последующих пространственных фильтров (ПФ).

Полная энергия  $E_{УСИ}$  измерялась за выходным компрессором при помощи калориметра Coherent.

Так как момент прихода рабочего импульса соответствует максимуму люминесценции и усиления активных элементов (АЭ), воздействие на мишень происходит в течение первых 600...700 мкс (рис. 2а). В указанном интервале содержится  $0,33 \cdot E_{УСИ}$  ( $\leq 10$  мкДж).

Прогреваемая область поверхности мишени соответствует изображению диафрагмы ПФ (рис. 2б). Плотность энергии УСИ  $F_{УСИ} \leq 0,07$  Дж/см<sup>2</sup>, интенсивность  $I_{УСИ} \ll 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, что значительно ниже порога ионизации. Данное излучение, однако, способно нагреть и испарить загрязнения, образуя «облако», взаимодействующее с основным импульсом [4], а также разрушить тонкую фольговую мишень (рис. 3).

Предельная толщина мишени  $d$  зависит от свойств материала, из которого она изготовлена: плотности  $\rho$ , теплоёмкости  $c$ , коэффициента поглощения  $\eta$  и температуры плавления  $T_{Пл}$ . Для её оценки можно воспользоваться простой формулой:

$$d \geq \frac{1}{T_{Пл}} \cdot \frac{\eta \cdot F_{УСИ}}{c \cdot \rho}$$

Наименьшая толщина облучаемой на установке Al фольги составляет  $\sim 100$  нм. Снижение энергии УСИ достигается при помощи использования более короткого импульса накачки ( $\sim$  в 2 раза) и плазменного зеркала (в  $10^3 \dots 10^4$  раз).

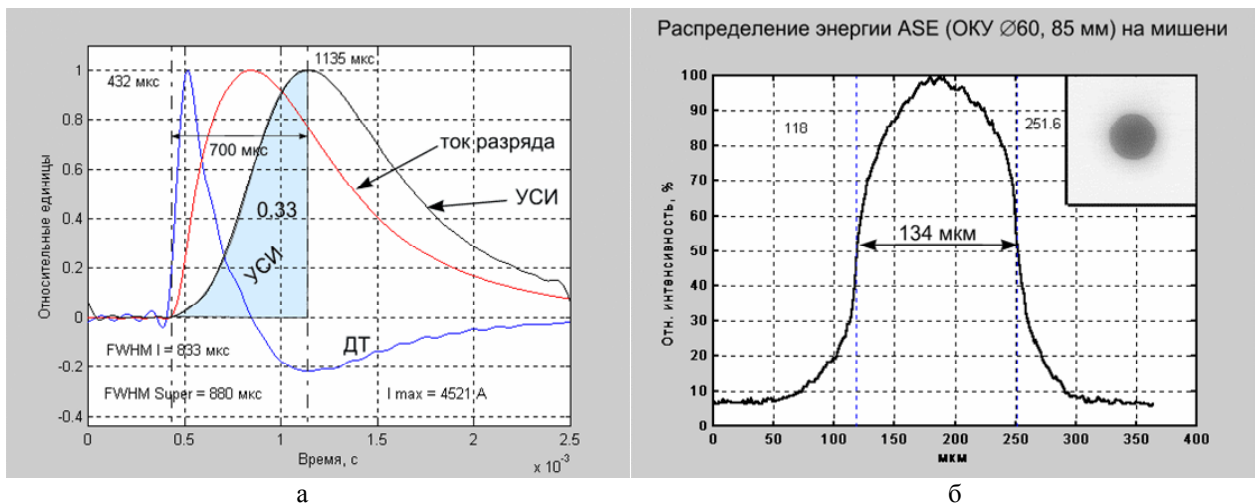


Рис. 2. Временной профиль импульса УСИ и тока ламп накачки (экспериментальные характеристики) – а; изображение излучения УСИ на мишени и профиль распределения – б

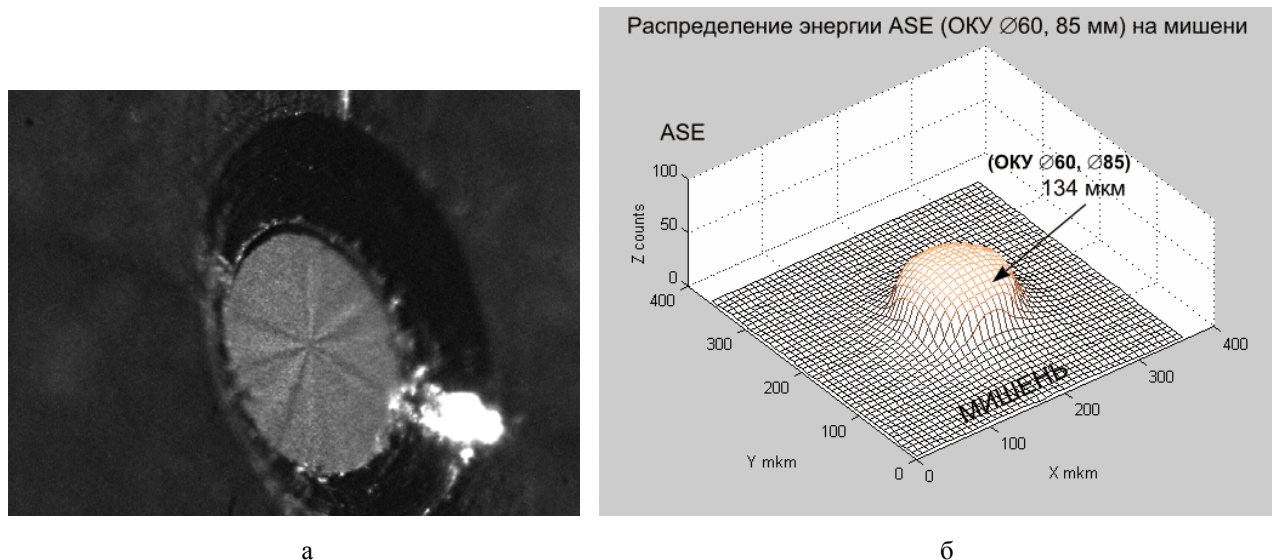


Рис. 3. Результат воздействия УСИ на Al 100 нм, фоновый выстрел – а; распределение энергии УСИ по поверхности мишени, полученное с помощью ПЗС-камеры – б

## 2. Короткий пьедестал УСИ (2 тип) и ультракороткий предимпульс $\Delta t = 12$ нс (3 тип)

Короткий предимпульс УСИ зарождается в регенеративном усилителе (РУ), и ввиду конечной скорости срабатывания электрооптических затворов Поккельса ( $t_{\text{ВКЛ}} \sim 5$  нс) беспрепятственно усиливается с тем же коэффициентом, что и рабочий импульс. Высокое значение контраста по короткому УСИ обеспечивается за счёт относительно большой энергии импульса задающего генератора (10 мкДж) и минимальных потерь в стретчере

( $\sim 0,6$ ). Измерение уровня излучения данного типа осуществлялось при помощи быстродействующего *p-i-n* фотодиода ( $t_{\text{ФР}} \sim 0,5$  нс) и 1 ГГц осциллографа Tektronix TDS684 ( $t_{\text{ФР}} \leq 0,3$  нс). Для защиты фотодиода от повреждения использовался плазменный затвор (ПЗ).

На рис. 4а представлена осциллограмма рабочего chirпированного импульса до выходного компрессора ( $\tau_{\text{ч}} \approx 600$  пс) [1], ослабленного в  $\geq 2 \cdot 10^9$  раз с помощью поглощающих фильтров (канал № 1). Когда фильтры извлечены (рис. 4б), всё слабое излучение до момента образования плазмы в ПЗ проходит без потерь. На переднем фронте наблюдается нарастающий в течение  $\sim 5$  нс

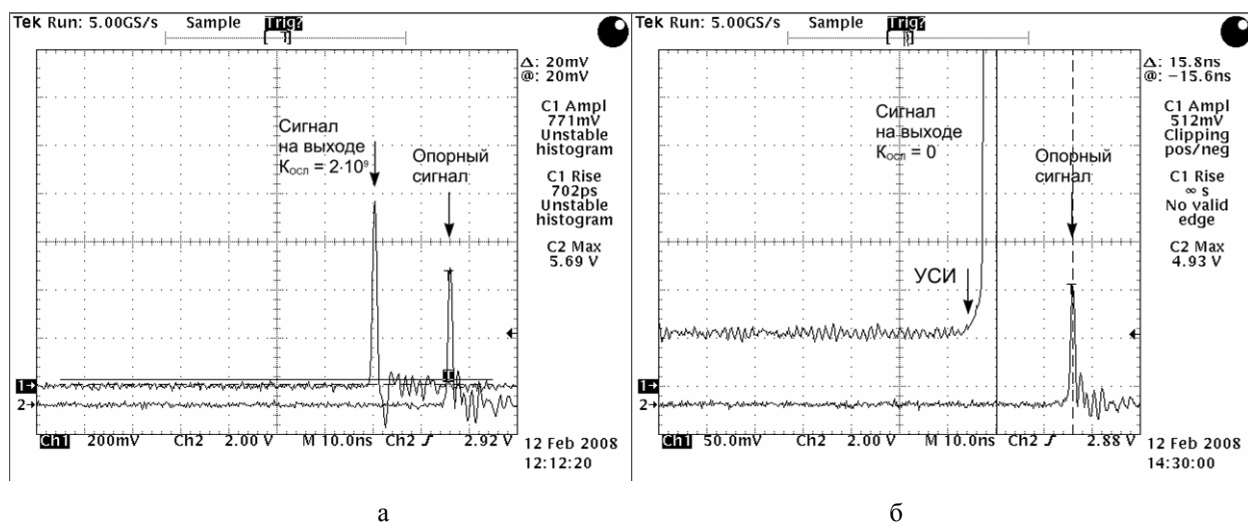


Рис. 4. Осциллограмма выходного лазерного импульса установки с поглощающими фильтрами (а) и без фильтров (б)

сигнал, который соответствует УСИ регенеративного усилителя. Учитывая, что длительность переходной характеристики измерительного тракта  $\sim 1$  нс, а длительность лазерного импульса после компрессора  $\leq 1$  пс, контраст по интенсивности УСИ РУ:  $K_{12} \geq 3 \cdot 10^{13}$ .

«Постоянная» составляющая сигнала (рис. 4б) соответствует «длинному» УСИ выходных усилителей. Данные измерения были проведены в 2008 году, когда контраст по энергии пьедестала УСИ  $K_E$  на мишени был хуже более чем в 5 раз (в настоящее время установлен дополнительный затвор Поккельса  $\varnothing 30$  мм). При пиковой на тот момент мощности лазерного импульса  $P_{\text{ли}} \approx 10$  ТВт мощность УСИ на выходе усилительного тракта  $P_{\text{УСИ}} \approx P_{\text{ли}}/K_{12} = 0,3$  Вт, а энергия  $E_{\text{УСИ}} = \int_0^{\tau_{\text{УСИ}}} P(t) dt \approx 100$  мкДж (рис. 2а), что соответствовало показаниям калориметра. На мишени данное значение уменьшается в 4 раза за счёт спектральных и поляризационных потерь в компрессоре.

Предимпульс длительностью  $\leq 1$  пс за время, равное периоду резонатора РУ (12 нс), на осциллограмме (рис. 4б) на уровне шумов не просмат-

ривается. Следовательно, контраст по интенсивности предимпульса (№ 3)  $K_{13} \geq 10^{11}$ .

### 3. Пьедестал рабочего ультракороткого импульса

Характеристика нарастания интенсивности рабочего импульса в области  $-100 \dots 0$  пс является важным параметром, который определяет свойства и состояние плазмы в момент прихода основной доли энергии.

Для исследования пьедестала в широком динамическом диапазоне обычно используется кросс-коррелятор III порядка. Основным его недостатком является необходимость большого количества измерений для сканирования даже небольших временных отрезков с требуемым разрешением. По этой причине с помощью кросс-коррелятора (СОМЕТ 1053-9, Avesta Project) исследован лазерный импульс с энергией  $\approx 1$  мДж на выходе диагностического компрессора стартового комплекса (СК), который имеет частоту срабатывания  $\sim 0,3$  Гц (рис. 5).

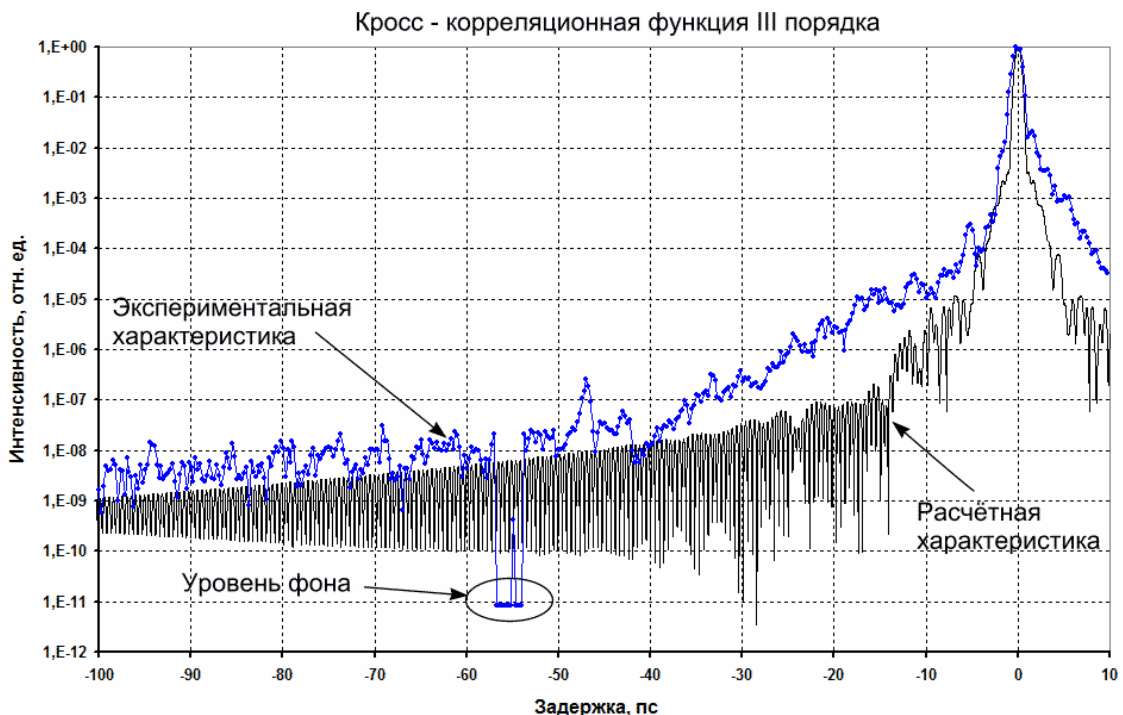


Рис. 5. Кросс-корреляционная функция III порядка ультракороткого импульса на выходе диагностического компрессора (синий цвет)

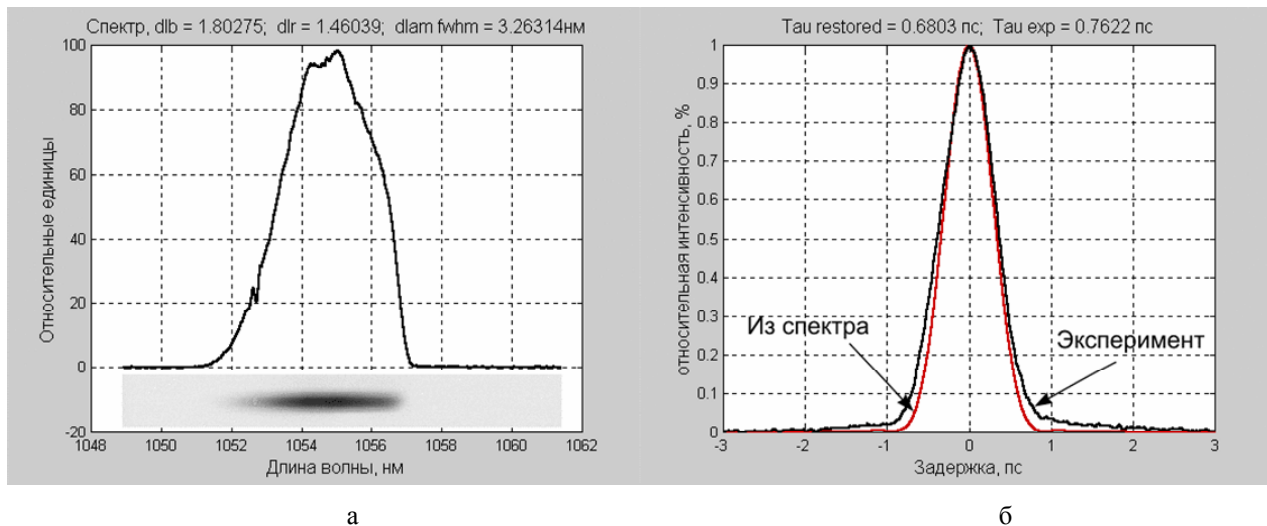


Рис. 6. Спектр лазерного импульса (а); автокорреляционная функция II порядка (б)

На рис. 5 чёрным цветом также представлен результат обратного Фурье – преобразования спектра лазерного импульса  $S(\omega)$ , измеренного экспериментально (рис. 6):  $I(\tau) = \overline{F}(\sqrt{S(\omega)}) \cdot \overline{F}^*(\sqrt{S(\omega)})$ . Различие на отрезке  $-40...-5$  пс обусловлено ошибками юстировки, а контраст на уровне  $\sim 10^8$  – резкими границами на краях спектра, которые возникают на оптических элементах стретчера.

Уровень пьедестала на выходе основного компрессора при энергии  $\sim 5$  Дж был определён в режиме одиночного выстрела с помощью плазменного затвора и стрик-камеры «ВЗГЛЯД-2А» с временным разрешением  $\sim 2$  пс (рис. 7). Пиковая интенсивность падающего излучения на поверхности стеклянной пластины ПЗ составляла  $I_0 \sim 6 \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>, а изображение фокального пятна ограничивалось диафрагмой  $D \approx 1,6 \cdot w$ ,  $w$  – диаметр пятна по уровню  $1/e$ .

На рисунке хорошо видно, что сигнал, соответствующий пьедесталу возникает резко, а его уровень в течение  $\tau_{П}$   $\sim 25$  пс практически не меняется. Такое поведение для реального импульса объясняется достаточно просто. Так как стрик-камера регистрирует мощность проходящего за ПЗ излучения, то для простого случая гауссова рас-

пределения фокального пятна  $P(t) = \pi w^2 \cdot I_{ПЛ}(t)$  ( $I_{ПЛ}(t)$  – величина интенсивности излучения на границе плазмы). Поскольку  $P(t)$  в указанном интервале можно считать постоянной, то  $I_{ПЛ}(-25) \approx I_{ПЛ}(0)$ . При этом  $t = -25$  пс соответствует моменту ионизации в пике фокального распределения, а  $t \approx 0$  пс – на периферии. Следовательно, для периферийной части  $I_{ПЛ} \sim 2 \cdot F_{ПЛ} / \tau_{П} = (12 \text{ Дж/см}^2) / (25 \text{ пс}) \approx 5 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> и  $K_{И}(-25 \text{ пс}) \sim 10^5$ .

На рис. 8 представлен результат моделирования  $I_{ПЛ}(t)$  (или  $P(t)$ ) для временного профиля импульса  $I(t)$ , восстановленного с помощью Фурье-преобразования (рис. 5): наблюдается качественное соответствие форме сигнала стрик-камеры, а также подтверждается достоверность приведённых рассуждений при оценке  $I_{ПЛ}$  и контраста.

#### 4. Ультракороткие предимпульсы в интервале $-1000...0$ пс

На рис. 7 кроме пьедестала отчётливо видны предимпульсы, находящиеся за десятки и сотни пикосекунд. Их наличие вызвано присутствием плоскопараллельных оптических элементов в оптическом тракте лазерной системы и связано

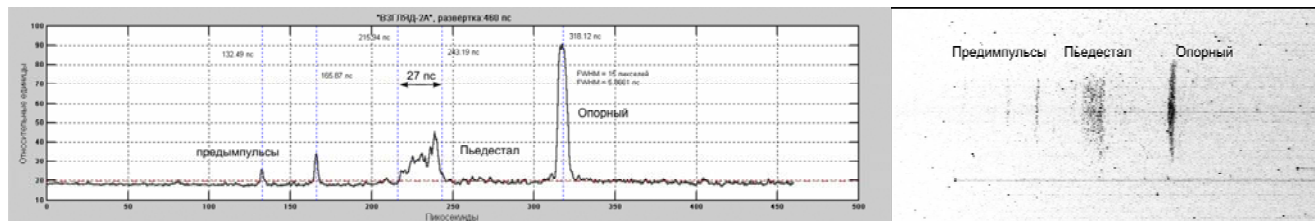


Рис. 7. Эпограмма проходящего за плазменный затвор излучения; опорный сигнал – для контроля входной энергии и временной привязки

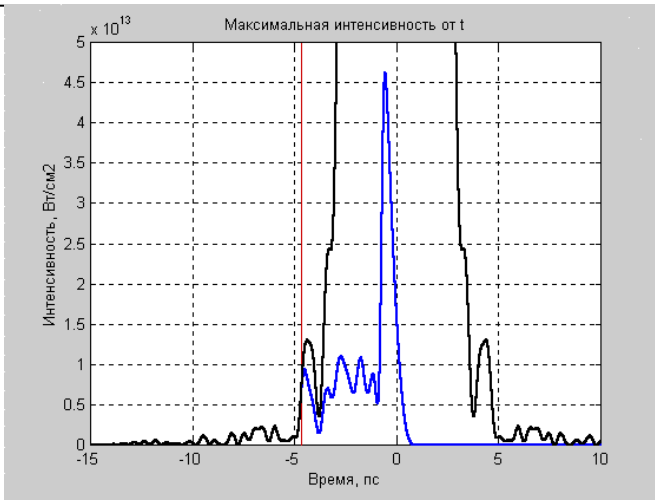


Рис. 8. Временной профиль  $I(t)$  (чёрный цвет) и  $I_{PI}(t)$  (синий цвет); момент начала ионизации выделен красной линией

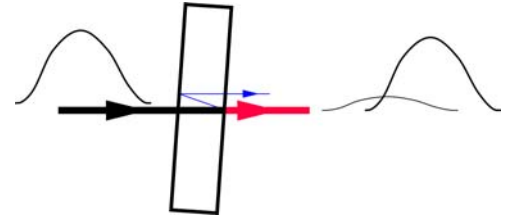


Рис. 9. Образование сонаправленной реплики chirпированного импульса в плоско-параллельном элементе

с особенностью принципа усиления, принятого в лазерах с ультракороткой длительностью импульса [5]. При прохождении chirпированного импульса через такой оптический элемент (поляризатор, зеркало, кристалл, пластина, и т. д.) образуется сонаправленная реплика, время задержки которой определяется толщиной, углом падения излучения и показателем преломления материала (рис. 9).

В результате интерференции перекрывающихся во времени импульсов возникает модуляция интенсивности. Дальнейшее прохождение модулированного импульса в нелинейной среде сопровождается фазовой самомодуляцией излучения и приводит к искажению спектральной фазы. В результате, после компрессии chirпа на выходе образуется серия пост-импульсов и предимпульсов, отстоящих от основного на величину кратную временной задержке. Интенсивности предимпульсов зависят от начального контраста импульса и его реплики и величины  $B$ -интеграла, характеризующего степень фазовой самомодуляции. По этой причине предимпульсы 5 типа наиболее ярко проявляются при максимальной выходной энергии

лазера, а без усиления не обнаруживаются. На монопольных установках их можно зарегистрировать только при помощи стрик-камеры с пикосекундным временным разрешением и плазменного затвора. Максимальный динамический диапазон измерений  $D_{И} = D_{СК} \cdot D_{ПЗ}$  определяется параметрами стрик-камеры ( $D_{СК} \sim 10$ ) и ПЗ ( $D_{ПЗ} \rightarrow F_0/F_{П} \sim 10^7$ ).

В эксперименте с полной выходной энергией ( $\sim 20$  Дж), где в качестве основного элемента плазменного затвора использовалось фокусирующее параболическое зеркало установки и прозрачная мишень, зарегистрирована серия плазмообразующих предимпульсов (рис. 10). В данной постановке эксперимента амплитуды сигналов соответствуют размерам образуемой плазмы, а положения на временной шкале указывают на оптические толщины элементов, которые их вызывают (в настоящее время все идентифицированы: электрооптические кристаллы DKDP, магнитооптические элементы ячеек Фарадея, зеркала, поляризаторы). Пьедестал ультракороткого импульса в приведённой эпограмме не наблюдается, так как данное

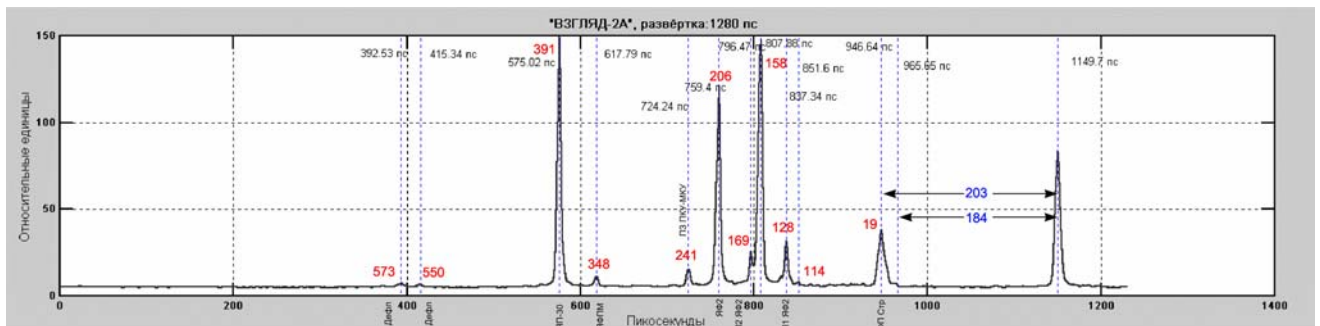


Рис. 10. Эпограмма плазмообразующих предимпульсов в интервале  $-1000 \dots 0$  пс

излучение экранируется плазмой, создаваемой предымпульсом (- 19 пс) от фазовой пластинки, расположенной перед стретчером (в настоящее время она ликвидирована).

Наиболее простой способ полного устранения предымпульсов – исключение из состава оптического тракта таких элементов, либо замена на клиновидные аналоги. Снижение  $V$ -интеграла и улучшение параметров просветляющих покрытий позволяет лишь частично снизить интенсивность ультракоротких предымпульсов, однако не является кардинальным методом.

### Список литературы

1. Гаврилов Д. С., Дмитров Д. А., Какшин А. Г., Капустин И. А., Лобода Е. А. «30-ТВт пикосекундная лазерная установка Сокол-П», XI

Забабихинские научные чтения, Снежинск, 16–20.04.2012, тезисы стр. 136;

2. Coherent Ultima Labmaster, LM-P2;

3. Du D., Liu X., Korn G., Squier J. and Mourou G. “Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs”, Appl. Phys. Lett. 64 (23), 6 June 1994, p. 3071;

4. Kakshin A. G., Gavrilov D. S., Dmitrov D. A., et al “The aspects of the high-contrast illumination of targets by laser radiation with  $I > 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> intensity on the Sokol-P 10 TW Nd:glass laser facility”, XXIX ECLIM 2006;

5. Didenko N. V., Konyashchenko A. V., Lutsenko A. P., Tenyakov S. Yu., "Contrast degradation in a chirped-pulse amplifier due to generation of prepulses by postpulses", // OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No. 5, 3178-3190 (2008).