

РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

*Л. А. Душина, Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко, В. В. Мисько, А. В. Сенник,
К. В. Стародубцев, В. М. Тараканов, А. Е. Чаунин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

Эксперименты на мощных лазерных установках, связанные с облучением мишеней, требуют детальной информации о профиле фронта греющего лазерного импульса. В зависимости от его крутизны, доля поглощённой лазерной энергии, переработанной в кинетическую энергию оболочки микромишени, и определяющая в конечном счёте параметры термоядерного микровзрыва, может изменяться в значительных пределах. Отсутствие информации о параметрах профиля фронта может привести к большим трудностям в трактовке результатов эксперимента. Особенно сложны измерения профиля фронта в экспериментах, где требование большого динамического диапазона регистрации ($\text{ДДР}_{\text{фр}} \geq 10^5$) сопряжено с необходимостью обеспечения высокого временного разрешения ($\tau_p \leq 0,1$ нс).

Ранее для получения информации о профиле фронта лазерного импульса на установке Искра-5 была разработана и внедрена фотохронографическая методика измерения мощностного контраста на первой гармонике йодного лазера в диапазоне от 1 до $10^{-5} P_{\text{max}}$ и временным разрешением $\tau_p = 25$ пс [1]. В этой работе приведено обоснование выбора фотохронографического регистратора на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), работающего в режиме щелевой развёртки изображения. Основным достоинством использования в качестве приёмника излучения ЭОП является его быстродействие: предельное временное разрешение ЭОП может достигать величин порядка 1 пс. Кроме того, ЭОП по своей сути является многоканальным устройством, позволяющим одновременную запись до 100 процессов.

Выбор ЭОП

Из работы [1], в которой описан метод измерения глубокого фронта импульса, следует, что чем больше линейный динамический диапазон

регистрации ($\text{ДДР}_{\text{лин}}$) измерительного канала, тем меньше число задействованных каналов и проще обработка полученной информации. В работе [2] проведено исследование работы ЭОП и показано, что линейный динамический диапазон имеющихся на то время ЭОП типа УМИ и ПИМ составляет $\text{ДДР}_{\text{лин}} = 25$. Там же показаны возможности реализации более высокого динамического диапазона и пути развития ЭОП в этом направлении.

Динамический диапазон регистрируемых интенсивностей излучения ограничен сверху предельной плотностью тока j_{max} с фотокатода ЭОП, при которой появляются искажения изображения на выходе ЭОП, а снизу – статистическим «дробовым» шумом. Для повышения динамического диапазона необходимо, во-первых, использование ЭОП с низкоомным фотокатодом, во-вторых, увеличение напряжённости электрического поля в прикатодной области. Причём увеличение напряжённости поля ведёт как к увеличению динамического диапазона, так и к улучшению предельного временного разрешения ЭОП.

В настоящее время ведутся работы по созданию ЭОП с высоким динамическим диапазоном регистрации $\text{ДДР}_{\text{лин}} \geq 10^3$ и временным разрешением до 1 пс. В этой разработке используются фотокатоды с низкоомной проводящей подложкой с сопротивлением до 200 Ом и напряжённостью поля в прикатодной области до 5 кВ/мм. В 2010 г. нами был получен макетный образец разрабатываемого ЭОП типа СПО23 с инфракрасным катодом S1 с целью исследования его характеристик на первой и второй гармониках неодимового лазера. Параметры ЭОП приведены в таблице 1.

На базе данного ЭОП был подготовлен макет щелевого фотохронографа с целью тестирования достигнутых характеристик разрабатываемого ЭОП и отработки фотохронографических методик.

Таблица 1

Фотохронограф

Технические характеристики ЭОП СПО23

| Наименование характеристики | Единица измерения | Измерено |
|--|-------------------|-----------------------|
| Размер рабочего поля фотокатода | мм | 10×3 |
| Абсолютная спектральная чувствительность фотокатода на длине волны 1060 нм | мА/Вт | 0,07 |
| Разрешение в центральной части фотокатода | штр/мм | 35 |
| Электронно-оптическое увеличение | отн. ед. | 1,67 |
| Чувствительности отклоняющих пластин: – пластины гашения (затворные) – калибровочные пластины – разверточные пластины | мм/В | 0,06 0,012 0,07 |
| Напряжение анод – фотокатод | кВ | минус 10,0 |
| Напряжение анод – ускоряющий электрод | кВ | минус 8,0 |
| Напряжение анод – фокусирующий электрод | В | 0 |
| Расчётное временное разрешение | пс | 3 |

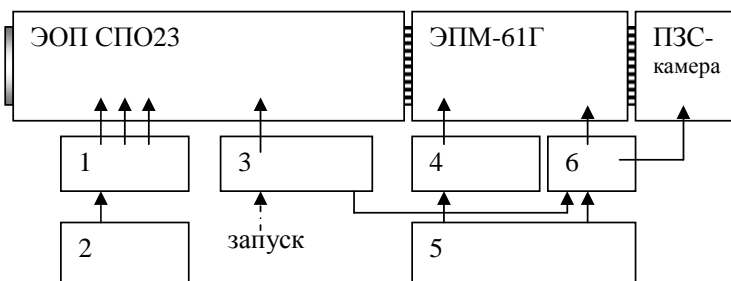
На этом фотохронографе была проведена отработка методики измерения мощностного контраста на второй гармонике неодимового лазера. Выбор ЭОП не является оптимальным с точки зрения измерений на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм (чувствительность мультищелочного фотокатода на этой длине волны излучения более чем на порядок выше), однако проверить предельные возможности по измерению профиля фронта лазерного излучения (ЛИ) позволяет.

Макет щелевого фотохронографа включает времяанализирующий ЭОП типа СПО23, усилитель яркости на МКП типа ЭПМ61Г (производство МЭЛЗ, г. Москва) и ПЗС-камера S2C-017APF (производство ООО «СТК СИЛАР», г. Санкт-Петербург). Для фотохронографа разработана и изготовлена новая электронная база: плата питания и блоки управления, развёртки и гашения.

Блок-схема фотохронографа представлена на рис. 1. В приборе предусмотрены оптический и электрический запуски. Блок развёртки сделан на транзисторах КТ683, работающих в лавинном режиме, скорость развертки от 10 до 20 нс/экран. Предусмотрены статический и импульсный режимы работы прибора: в статическом режиме развёртка отключена, питание усилителя яркости постоянное; в импульсном режиме развёртка включена, питание усилителя импульсное, с запуском от синхросигнала развёртки.

Оптическая настройка прибора производилась с помощью миры ГОИ № 3 с максимальной частотой штрихов (10-е поле миры) – 21 пар штр./мм. Входной вертикальной щелью вырезалась часть изображения миры от 6-го до 10-го поля. Из прописи 10-го поля получено, что фотохронограф обеспечивает пространственное разрешение по входу 21 пар штр./мм с контрастом 7,5 %.

Техническое временное разрешение регистратора, задаваемое длительностью развертки (10 нс/экран) и входной щелью регистратора (50 мкм), составляет 60 пс (предельное физическое временное разрешение ЭОП – не более 3 пс).



- 1 – электрическая схема высоковольтного делителя для питания ЭОП;
- 2 – высоковольтные источники питания;
- 3 – схема развёртки и гашения;
- 4 – электрическая схема высоковольтного делителя для питания ЭПМ-61Г;
- 5 – источники питания для делителя, МКП;
- 6 – схема импульсного питания МКП.

Рис. 1. Структурная схема фотохронографа

Измерение линейного динамического диапазона проводилось с помощью импульсного неодимового лазера LCS-DTL-328QT с длительностью импульса $T = 2,5\text{--}3$ нс на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм. Импульс имел временную субструктуру с периодом $\Delta T = 0,5$ нс. Динамический диапазон фотохронографа определялся путем регистрации лазерного импульса при разных уровнях входного сигнала. В качестве критерия определения нижнего и верхнего порогов регистрации использовалось общепринятое условие изменения длительности импульса на 20 % [3].

При максимальной нагрузке у фотохронографа происходит насыщение ПЗС-камеры (максимальное число отсчётов ПЗС-камеры составляет $I_{\max} = 16000$). Минимальное значение интенсивности, при которой погрешность определения длительности импульса не превышает 20 %, составило $I_{\min} = 12$. Таким образом, линейный динамический диапазон фотохронографа $\text{ДДР}_{\text{лин}} = 1300$.

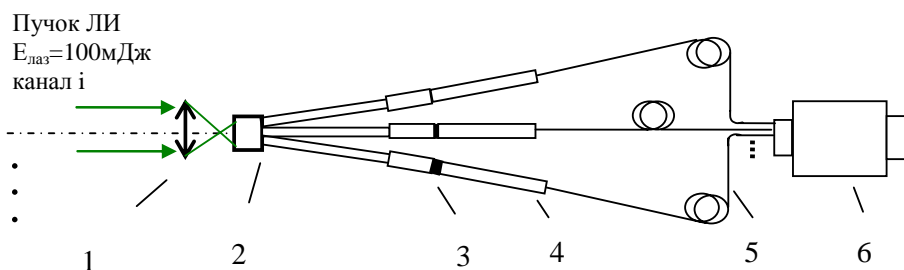
Схема измерительного канала методики

Как было сказано выше, разрабатываемая методика в основном ориентирована на регистрацию мощностного контраста ЛИ в условиях большого числа лазерных каналов для проектируемой установки. На установке Искра-5 фотохронографическая методика измерения мощностного контраста ЛИ была выполнена в одноканальном варианте: один канал регистрации – один фотохронограф. В условиях многоканальной установки с большим количеством подсистем важной становится задача минимизации площади размещаемого оборудования, стоимости оборудования и стоимости его обслуживания. По этой причине было предложено изменить методику регистрации глубокого фронта ЛИ, применённую на установке Искра-5, выпол-

нив её на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Комплекс регистрации ЛИ можно строить на базе ВОЛС по принципу один канал – одно волокно с последующим вводом ряда каналов на один ЭОП [4]. Применение ЭОП с фотокатодом большой длины позволяет объединить на одном приборе десятки измерительных каналов.

На рис. 2 приведена схема методики измерения мощностного контраста, выполненная на основе ВОЛС. Излучение для регистрации поступает на фокусирующую линзу 1, которая строит на входе волоконного световода 2 изображение ближней зоны ЛИ в параксиальных лучах $\alpha \leq \alpha_a$, где $\alpha_a = 10^\circ$ – апертурный угол ввода излучения в ВОЛС. Этим достигается равномерная засветка световода, исключая оптический пробой на его торце. Выход световода 2 разбит на несколько соответственно меньших по диаметру световодов. Для усреднения излучения и выравнивания его по отдельным каналам регистрации используется световод со смешанным коллектором. Расстояние между выходом волоконного световода 2 и входом ВОЛС 5 $l_s = 5$ см выбирается из условия полного перекрытия элементарных световых конусов от отдельных жил световода. Для исключения искажающего влияния спекловой структуры когерентного излучения на регистрацию после волоконного рассеивателя и для более эффективного ввода энергии, выходной световод стыкуется с ВОЛС через светопровод в виде кварцевого стержня 4 с полированными поверхностями.

На вход волоконного световода возможно заведение энергии до 0,1 Дж без возникновения пробоя на его поверхности. Для рассмотренного способа ввода излучения с использованием многомодового градиентного ВОЛС диаметром $d = 62$ мкм коэффициент ослабления по энергии составляет $K = 10^4$.



1 – фокусирующая линза; 2 – волоконный световод; 3 – оптические ослабители; 4 – кварцевый стержень; 5 – ВОЛС; 6 – фотохронограф.

Рис. 2. Схема измерения мощностного контраста, выполненная на основе ВОЛС

В тоже время порог регистрации измерительного канала по энергии достаточно мал:

$$E_{\text{пор}} = P_{\text{пор}} \tau_{0,5} S_{\text{св}} \leq 10^{-12} \text{ Дж}, \quad (4)$$

где $P_{\text{пор}} \leq 1 \text{ Вт/см}^2$ – порог регистрации мощности излучения на $\lambda = 0,53 \text{ мкм}$, $\tau_{0,5} = 5 \text{ нс}$ – длительность лазерного импульса, $S_{\text{св}} = 10^{-4} \text{ см}^2$ – площадь торца ВОЛС.

Такой запас чувствительности позволяет применить систему измерения с ранжированием сигнала до 10^7 – 10^8 раз.

Между выходами световода 2 и кварцевыми стержнями 4 установлены оптические ослабители с шагом ослабления 100. Для измерений мощного контраста в одной точке используются три канала с ранжированием сигнала. Кабели ВОЛС в плоскости времени анализирующей щели фотохронографа сформированы в виде линейки, при этом один фотохронограф может обслужить до 8 измерительных точек.

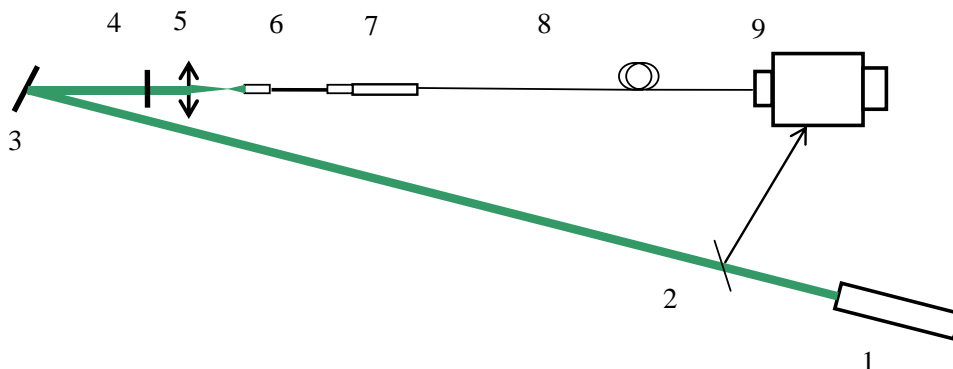
Для улучшения качества регистрации (уменьшения влияния рассеяния и расплывания сигналов в областях насыщения) сигналы, измеряемые в нелинейном режиме, регистрировались с временной задержкой, подобранной таким образом, чтобы области сигналов с интенсивностью более 16000 отсчётов выводились за область регистрации ЭОП.

Экспериментальная отработка методики

Экспериментальная отработка методики измерения мощного контраста ЛИ проводилась на излучении импульсного неодимового лазера ЛТИ-44 (производство ВНИИОФИ, Москва) на длине волны $\lambda = 0,53 \text{ мкм}$. Длительность импульса составляла $T = 5 \text{ нс}$, энергия – $E = 40 \text{ мДж}$. Лазерный импульс имел нестабильную временную субструктуру с периодом от 0,2 до 0,5 нс. Основная направленность исследований заключалась в получении информации о возможности достижения максимального динамического диапазона регистрации глубокого профиля фронта, а также в проверке работоспособности предложенной измерительной схемы на базе ВОЛС.

Оптическая схема регистрации профиля фронта ЛИ приведена на рис. 3.

Схема регистрации по сути соответствует схеме, но выполнена в одноканальном варианте, так как энергия лабораторного лазера ЛТИ-44 оказалась недостаточной для деления сигнала на три ранжированных канала. Измерения с ранжированием проводились в трех экспериментах с последовательным увеличением входного сигнала с шагом в 100 раз (шаг ранжирования 100). При увеличении мощности входного сигнала в ВОЛС вводилась дополнительная задержка, выводящая область изображения в насыщении за экран камеры. Кроме того, ЭОП фотохронографа содержит пластины гашения, уводящие пучок фотоэлектронов с рабочей траектории в специальную ловушку, что позволяет исключить рассеяние большого сигнала внутри ЭОП и попадания его на выходной экран.



1 – импульсный лазер $E_{\text{лаз}}=40 \text{ мДж}$, $\lambda=0.53 \text{ мкм}$, $\tau=10 \text{ нс}$; 2 – пластина запуска; 3 – поворотное зеркало; 4 – оптический ослабитель; 4 – фокусирующая линза; 6 – волоконный световод со смешанным коллектором; 7 – кварцевый стержень; 8 – ВОЛС; 9 – фотохронограф.

Рис. 3. Оптическая схема регистрации глубокого фронта ЛИ

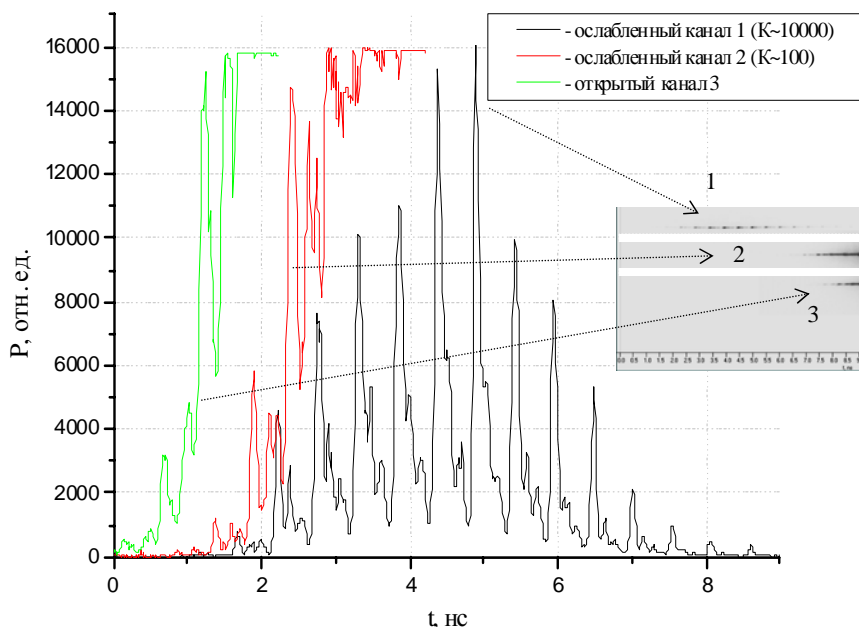


Рис. 4. Результаты регистрации глубокого фронта ЛИ и временные прописи сигналов: 1, 2, 3 – эпограммы импульса ЛИ в 3-х опытах

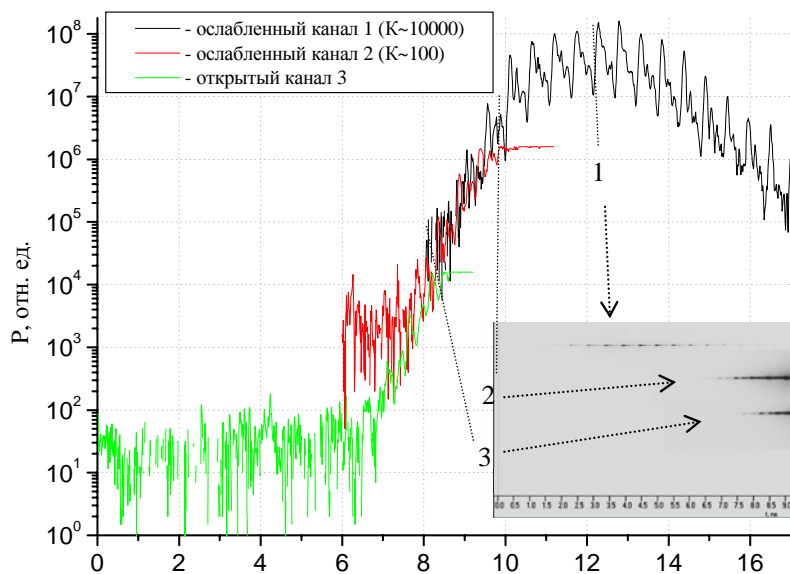


Рис. 5. Результат обработки эпограмм с учётом коэффициентов ранжирования и временных задержек каналов: 1, 2, 3 – эпограммы регистрации импульса ЛИ в 3-х опытах

При длительности развертки $T_p = 10$ нс/экр. фотохронограф обеспечивает техническое временное разрешение регистрации $\tau_p = 60$ пс (предельное физическое временное разрешение ЭОП составляет 3 пс).

На рис. 4–6 представлены результаты регистрации профиля фронта лазерного импульса. На рис. 4 приведены полученные эпограммы и временные прописи сигналов. В первом канале, мак-

симально ослабленном, ведётся регистрация формы ЛИ в линейном режиме работы ЭОП, с динамическим диапазоном $ДДР_{лин} = 1300$. Вторым и третий каналы регистрируются в режиме насыщения ЭОП с ростом мощности облучения соответственно шагу ранжирования. Задержка сигнала второго канала относительно первого составляла 5 нс, задержка между третьим и вторым сигналами – 2,5 нс. Прописи сигналов 2 и 3 на рис. 4 для

наглядности смещены по временной оси. Диаграммы мощности приведены в относительных единицах.

Мощность облучения в 3-м (открытом) канале была в несколько раз ниже максимально допустимой облучённости фотокатода $P_s^{\max} = 5 \cdot 10^6$ Вт/см², которая соответствует порогу повреждения [1]. Во время измерений было проведено многократное (>10) срабатывание в режиме максимальной облучённости фотокатода. Проверка показала, что в результате испытаний фотокатод не пострадал: не было послесвечений, следов ожогов, потери чувствительности.

В диаграммы, представленные на рис. 5, введена коррекция, учитывающая указанную методическую временную задержку и коэффициенты ранжирования соответствующих каналов.

На рис. 6 приведён конечный результат восстановления глубокого фронта лазерного импульса. В результате обработки сигнала ЛИ, зарегистрированного с ранжированием, была получена форма профиля фронта импульса с динамическим диапазоном около 10^7 . Скорость нарастания фронта ЛИ составила 0,5 нс на порядок изменения мощности.

Для проведённых исследований применялся ЭОП с инфракрасным фотокатодом S1, характерная чувствительность которого на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм составляет $\phi_{\lambda} \sim 1$ мА/Вт. Чувствительность мультищелочного фотокатода ЭОП, более подходящего для видимого диапазона на этой длине волны, на порядок выше. Как было показано

в п.1, динамический диапазон регистрации глубокого фронта напрямую зависит от чувствительности фотокатода, поэтому применение ЭОП с мультищелочным фотокатодом вместо фотокатода S1 позволит расширить динамический диапазон регистрации до 10^8 .

Оценка количества регистрируемых лазерных каналов, которое можно разместить на одном регистраторе, дает следующее. Вертикальный размер щели фотохронографа составляет 12 мм, вертикальный размер поля отдельного канала ВОЛС (с учетом его резервирования для исключения взаимовлияния канала на канал) – не более 0,5 мм. Учитывая, что для регистрации в одной измерительной точке требуется три ранжированных канала, с помощью одного фотохронографа можно обслужить до 8 измерительных точек.

Заключение

Разработана методика измерения мощностного контраста лазерного импульса на второй гармонике моделирующих установок до уровня $>10^5$. Методика выполнена на базе скоростного фотохронографа и волоконно-оптических линий связи.

Методика позволяет обеспечить следующие параметры регистрации:

- динамический диапазон измерения мощностного контраста лазерного импульса на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм – 10^7 ;

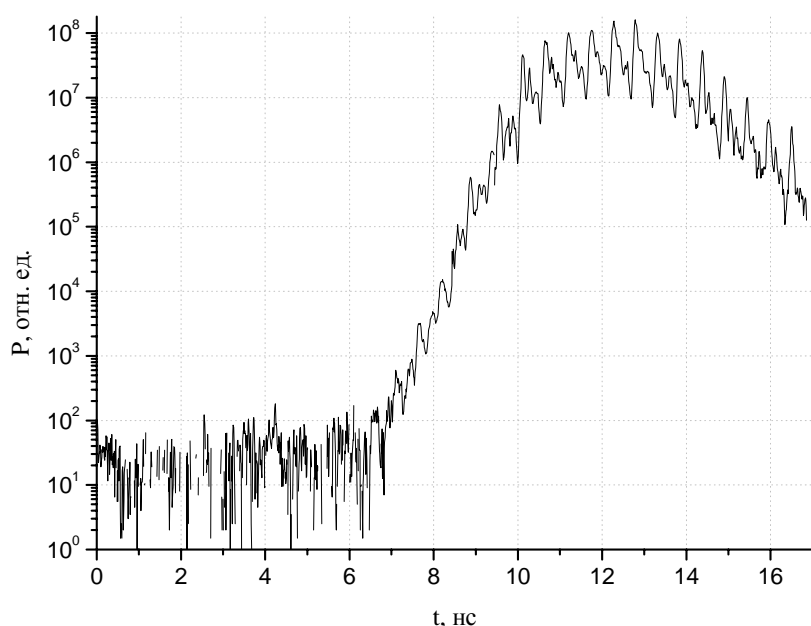


Рис. 6. Результат восстановления глубокого фронта лазерного импульса

– временное разрешение канала регистрации – 60 пс;

– количество измерительных точек, обслуживаемых одним фотохронографом – до 8.

Показан путь повышения мощностного контраста на $\lambda = 0,53$ мкм до 10^8 за счёт применения электронно-оптического преобразователя с более подходящим типом фотокатода (мультищелочной) на этой длине волны.

Проведено тестирование макета фотохронографа на основе электронно-оптического преобразователя типа СПО23 с высоким линейным динамическим диапазоном. Динамический диапазон регистрации формы импульса лазерного излучения составил $\text{ДДР}_{\text{лин}} = 1300$.

Список литературы

1. Кирдяшкин М. Ю., Муругов В. М., Окутин Г. П., Сенник А. В. Регистрация профиля фрон-

та субнаносекундного лазерного импульса с большим динамическим диапазоном, Квантовая электроника, 1992. 19, 1032, № 10.

2. Муругов В. М., Окутин Г. П., Петров С. И., Панкратов В. И. Применение электронно-оптических преобразователей для регистрации излучения йодного лазера субнаносекундной длительности, Приборы и техника эксперимента, 1993. № 2, 155.

3. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988. С. 112.

4.. Воронцов Е. Н, Кирдяшкин М. Ю., Кравченко А. Г. и др., диагностика физического таутохронизма лазерных пучков на многоканальной установке «Искра-5» // Квантовая электроника, 1994. 21, № 10. С. 994.

5. Гроднев И. И. Волоконно-оптические линии связи, М.: Радио и связь, 1990 . С. 55.