

УДК 621.386.8

# Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза

Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко,  
Д. Н. Литвин, В. В. Мисько,  
А. Н. Рукавишников, А. В. Сеник,  
К. В. Стародубцев, В. М. Тараканов,  
А. Е. Чаунин

*Представлены результаты разработки фотохронографического регистратора для новой лазерной установки УФЛ-2М. Данный фотохронограф предназначен для диагностики параметров лазерного излучения и плазмы. Разработанный прибор имеет следующие основные характеристики: предельное временное разрешение  $\leq 5$  пс, пространственное разрешение  $\geq 20$  пар штрихов/мм, динамический диапазон  $\geq 1000$ .*

## Введение

Современный уровень постановки экспериментов по программам лазерного термоядерного синтеза на установках нового поколения NIF (США), LMJ (Франция), УФЛ-2М (Россия) выдвигает повышенные требования к методам диагностики лазерного излучения и плазмы, в том числе и к фотохронографической регистрации.

Многоканальная лазерная установка требует измерения временной формы лазерного импульса в каждом канале, таутохронизма лазерных каналов [1]. Использование для облучения мишеней профилированных лазерных импульсов обусловило особую остроту проблемы реализации динамического диапазона регистрации ( $DR$ ) на уровне  $\geq 10^3$ .

Короткие мощные лазерные импульсы для создания точечных лазер-плазменных источников рентгеновского излучения в целях диагностики, а также для реализации режима «быстрого зажигания» потребовали повышения временного разрешения регистрации до  $\tau \sim 1$  пс. Детальная регистрация пространственно-временной структуры лазерного излучения, сжатия термоядерных мишеней, динамики развития плазменных образований, переноса рентгеновского излучения в замкнутых полостях, исследования газодинамических процессов при лазерном и рентгеновском воздействии на образцы требует разработки методов регистрации, обладающих сочетанием высоких временного, пространственного, спектрального разрешений и динамического диапазона.

Единственным прямым способом измерения параметров быстропротекающих процессов с характерным временем  $\tau \sim 10^{-11} - 10^{-9}$  с и обладающим наряду с этим достаточно высоким пространственным разрешением ( $\leq 100$  мкм) является высокоскоростная развертка изображения, основанная на применении электронно-оптических преобразователей (ЭОП) [2, 3].

В настоящее время ведутся разработки базовой модели стрик-камеры для установки УФЛ-2М. Для этого проведено сравнительное тестирование ряда отечественных ЭОП как в составе серийных регистраторов (камера К014 с ЭОП ПИМ-112 производства компании БИФО (Москва)), так и в составе макетных образцов разработки ВНИИЭФ (СПО9 и СПО23 производства ВНИИ автоматики (ВНИИА), ПИМ-103 производства компании БИФО).

Сравнение камер с ЭОП ПИМ-112, ПИМ-103, СПО9 и СПО23 показало, что ЭОП СПО23 производства ВНИИА наиболее близко соответствует требованиям экспериментов на установке УФЛ-2М.

## ***1. Фотохронограф СЭР-4***

К моменту начала проведения модернизации комплекса фотохронографической аппаратуры на лазерных установках «Искра-5» и ЛУЧ успешно эксплуатировался оптический фотохронограф СЭР-4. В регистраторе в качестве времяанализирующего каскада использован ЭОП ПИМ-103 разработки ВНИИ оптико-физических исследований (в настоящее время его производством занимается компания БИФО).

Данная камера имеет следующие основные технические характеристики: предельное временное разрешение  $\geq 10$  пс; пространственное разрешение  $\geq 20$  пар штрихов/мм; динамический диапазон  $\geq 30$ .

Для целей строящейся установки УФЛ-2М ряд параметров потребовал улучшения. В первую очередь это временное разрешение и динамический диапазон регистрации.

## ***2. Времяанализирующий ЭОП***

### ***2.1. Требования к ЭОП. Пути повышения динамического диапазона и временного разрешения***

Известным способом повышения динамического диапазона ЭОП является формирование фотокатода на электропроводящей низкоомной подложке. Эта технология значительно устраняет проблемы, связанные с искажениями изображения при отборе больших импульсных токов.

Временное разрешение фотохронографических регистраторов принято характеризовать физическим (предельным) и техническим временным разрешением. Реальное временное разрешение определяется худшей из этих составляющих. Физическое временное разрешение обусловлено растягиванием пакета электронов, одновременно эмитированных катодом, за время пролета до отклоняющих пластин, являющихся времяанализирующим элементом. В основном физическое временное разрешение зависит от ширины спектра фотоэлектронов и напряженности электрического поля в прикатодной области.

Для повышения физического временного разрешения ЭОП необходимо повышать напряженность электрического поля в прикатодной области. При этом увеличение напряженности поля ведет как к улучшению предельного временного разрешения ЭОП, так и к увеличению динамического диапазона.

Таким образом, были выработаны требования, на основании которых было разработано техническое задание ВНИИЭФ, целью которого являлось изыскание принципов и путей модернизации времяанализирующего ЭОП, а также разработка хронографического электронно-оптического регистратора, адаптированного к реальным условиям эксплуатации на установке УФЛ-2М, с высоким динамическим диапазоном регистрации  $\geq 1000$  и временным разрешением до 1 пс.

Работа проводится совместно с предприятиями ВНИИА и БИФО. В результате выполнения этапов этих работ нами были получены электронно-оптическая камера К014 на базе ЭОП ПИМ-112 производства компании БИФО и электронно-оптические преобразователи СПО9 и СПО23 производства ВНИИА.

## 2.2. Сравнительные измерения динамического диапазона регистраторов с ЭОП ПИМ-112, СПО9 и СПО23

С целью проверки технических характеристик было проведено сравнительное тестирование динамического диапазона, пространственного и временного разрешений приборов на базе ПИМ-112, СПО9 и СПО23.

Для работы с ЭОП СПО9 и СПО23 были подготовлены регистраторы в конструкции камер СЭР-4. Запись результатов регистраций осуществлялась на ПЗС-камеры. Динамический диапазон ПЗС-камер составлял 2000. Максимальное значение интенсивности этих камер составляло  $I_{\max} = 16000$  отсчетов ПЗС.

Исследования проводились с помощью импульсного неодимового лазера LCS-DTL-328QT с длительностью импульса 2,5–3 нс на длине волны  $\lambda = 0,53$  мкм. Импульс имел временную субструктуру с периодом 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 % [4].

При увеличении облученности фотокатода с некоторого уровня начинается нелинейная передача ЭОП яркостно-пространственных характеристик изображения (насыщение ЭОП). Эффект насыщения объясняется тем, что при росте облученности фотокатода происходит нарушение эквипотенциальности катода, что приводит к дефокусировке изображения на экране и потере пространственного и временного разрешений.

Нижний порог регистрации ограничен статистическим шумом фотоэмиссии с разрешаемого элемента. Зашумленность сигнала оценивается величиной отношения сигнал/шум. Если допустить погрешность измерений равной 20 %, то отношение сигнал/шум равно 5. Поэтому при обработке слабых сигналов максимальная интенсивность этого сигнала превышала дисперсию фонового сигнала в 5 раз.

Исследования всех ЭОП были проведены в одинаковых условиях. Техническое временное разрешение регистрации составляло 60 пс.

При обработке кадров пространственная ширина участка выбиралась размером 100 мкм, что примерно соответствует размеру изображения световолокна на экране регистратора.

Примеры регистрируемых изображений и характерная временная форма лазерного импульса, полученные при максимальном и минимальном уровнях входных сигналов и в линейном режиме, приведены на рис. 1–3.

Обработка полученных результатов дала следующее. Длительность лазерного импульса (на уровне интенсивности  $0,5I_{\max}$ ), снятого в линейном режиме, составила  $\tau_{0,5} = 2,8$  нс.

Для ЭОП СПО9 (рис. 1) насыщение начиналось при сигнале интенсивностью  $I_{\max} \geq 14000$  отсчетов ПЗС. При сигнале интенсивностью  $I_{\max} = 25$  отсчетов ПЗС измерение соответствовало нижнему порогу регистрации. Динамический диапазон регистратора составил

$$DR = 14000/25 \approx 600.$$

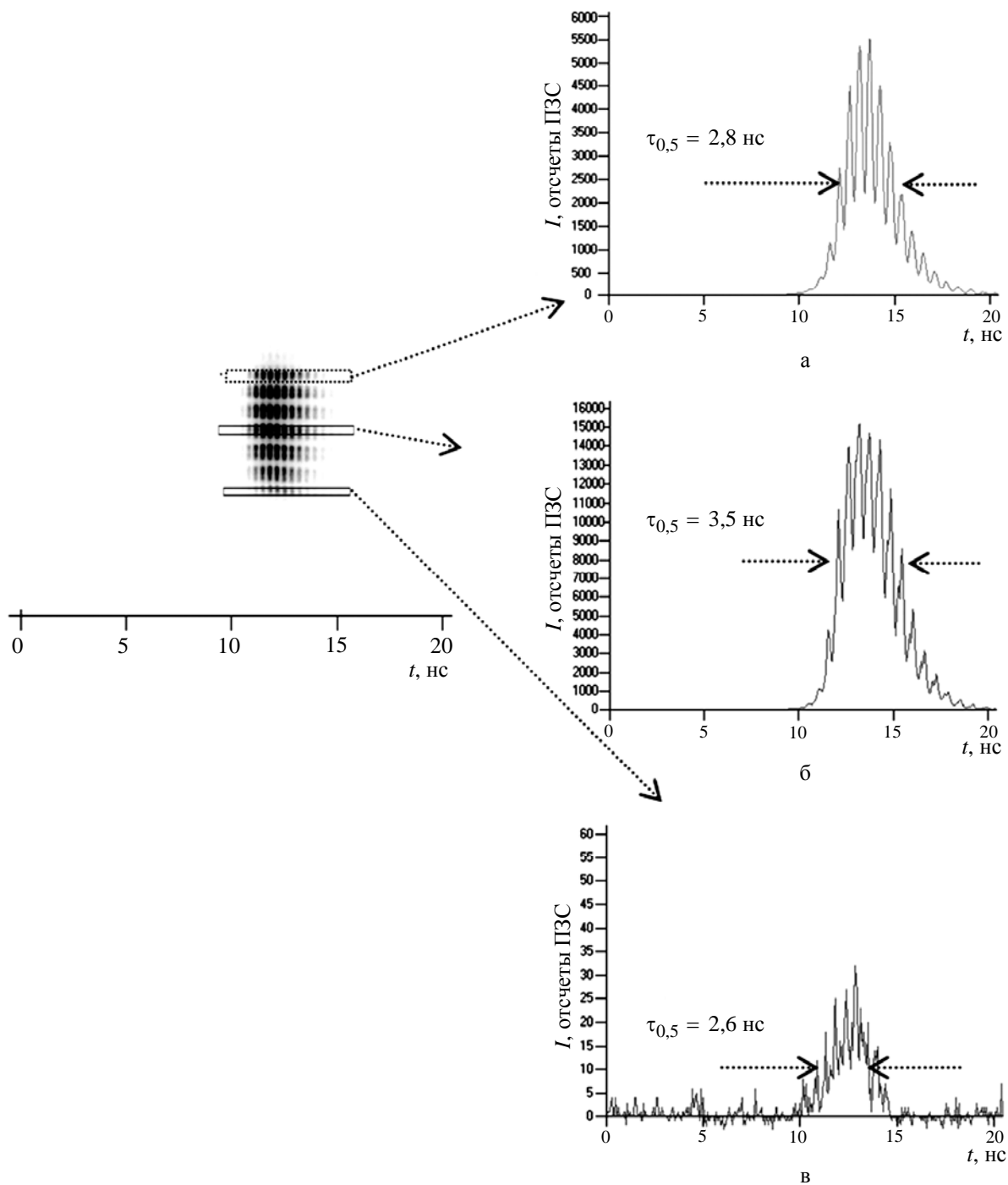


Рис. 1. Регистрация формы лазерного излучения с ранжированием на входе камеры с ЭОП СПО9: а – форма сигнала в середине линейного динамического диапазона; б – форма сигнала при максимально допустимом уровне сигнала (начало насыщения); в – форма слабого сигнала, соответствующего нижнему порогу регистрации

Для ЭОП ПИМ-112 (рис. 2) сигнал интенсивностью  $I_{\max} \geq 3500$  отсчетов ПЗС соответствовал верхнему порогу регистрации (начало насыщения). При сигнале интенсивностью  $I_{\max} = 100$  отсчетов ПЗС измерение соответствовало нижнему порогу регистрации. Динамический диапазон регистратора составил

$$DR = 3500/100 \approx 35.$$

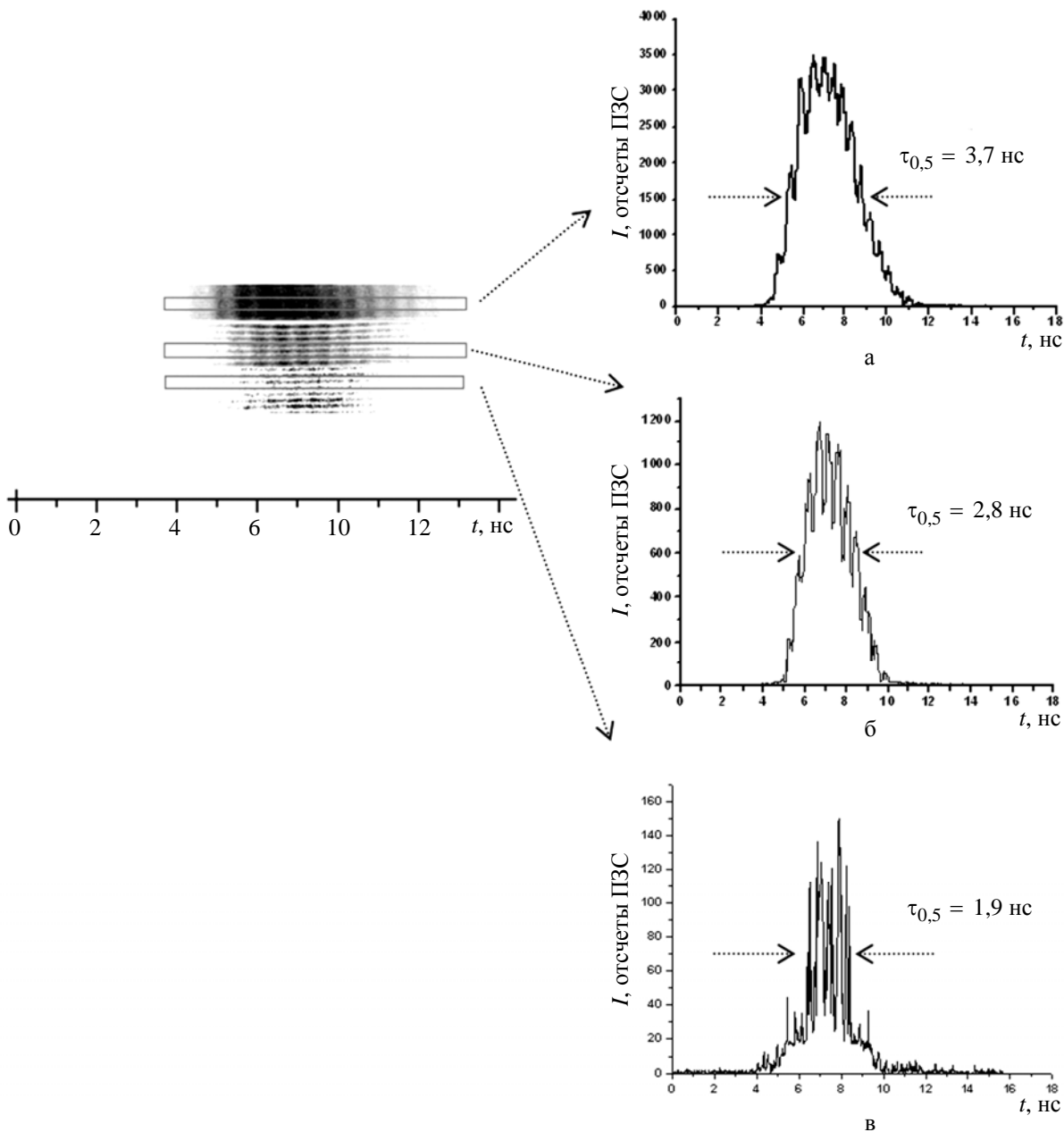


Рис. 2. Регистрация формы лазерного излучения с ранжированием на входе камеры с ЭОП ПИМ-112: а – форма сигнала при максимально допустимом уровне сигнала (начало насыщения фотокатода); б – форма сигнала в линейном режиме; в – форма слабого сигнала, соответствующего нижнему порогу регистрации

Для ЭОП СПО23 (рис. 3) верхний предел регистрации составил  $I_{\max} = 15000$  отсчетов ПЗС. Интенсивность сигнала, соответствующего нижнему порогу регистрации, составила  $I_{\min} = 12$  отсчетов ПЗС. Динамический диапазон регистратора

$$DR = 15000/12 \approx 1300.$$

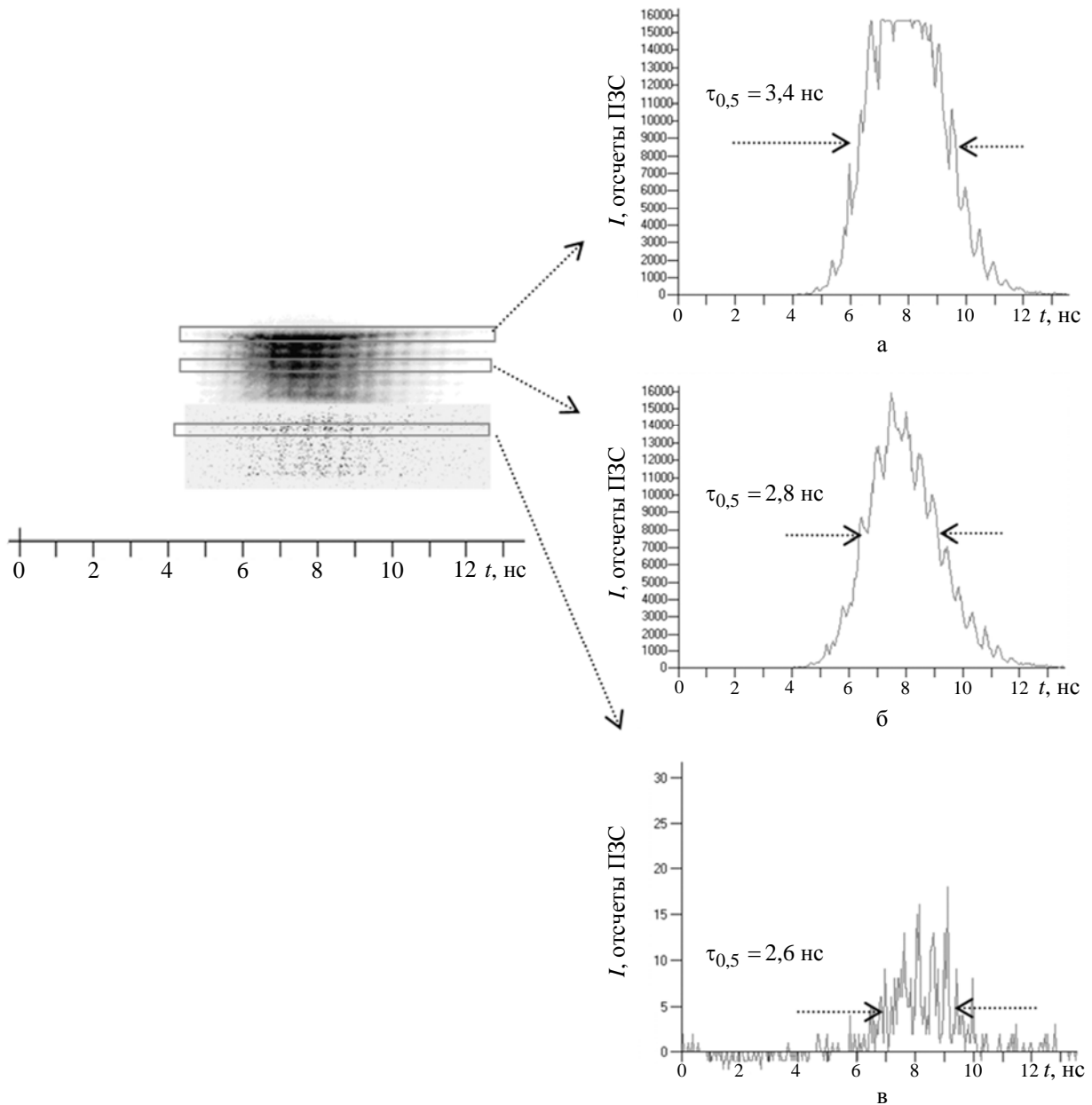


Рис. 3. Регистрация формы лазерного излучения с ранжированием на входе камеры с ЭОП СПО23: а – форма сигнала при насыщении ПЗС; б – форма сигнала в линейном режиме; в – форма слабого сигнала, соответствующего нижнему порогу регистрации

Из всех исследованных фотохронографов ЭОП СПО23 обеспечил самый высокий динамический диапазон. Полученное значение  $DR = 1300$  полностью обеспечивает требования по этому параметру при регистрации формы импульса лазерного излучения на установке УФЛ-2М.

### 2.3. Пространственное разрешение камер ЭОП ПИМ-112, СПО9 и СПО23

Измерение пространственного разрешения осуществлялось в статическом режиме работы камер с помощью щелевой миры, располагаемой на входе на месте времяанализирующей щели.

На рис. 4 приведены изображения щелевой миры и частотно-контрастные характеристики фотохронографов с ЭОП: ПИМ-112, СПО9 и СПО23.

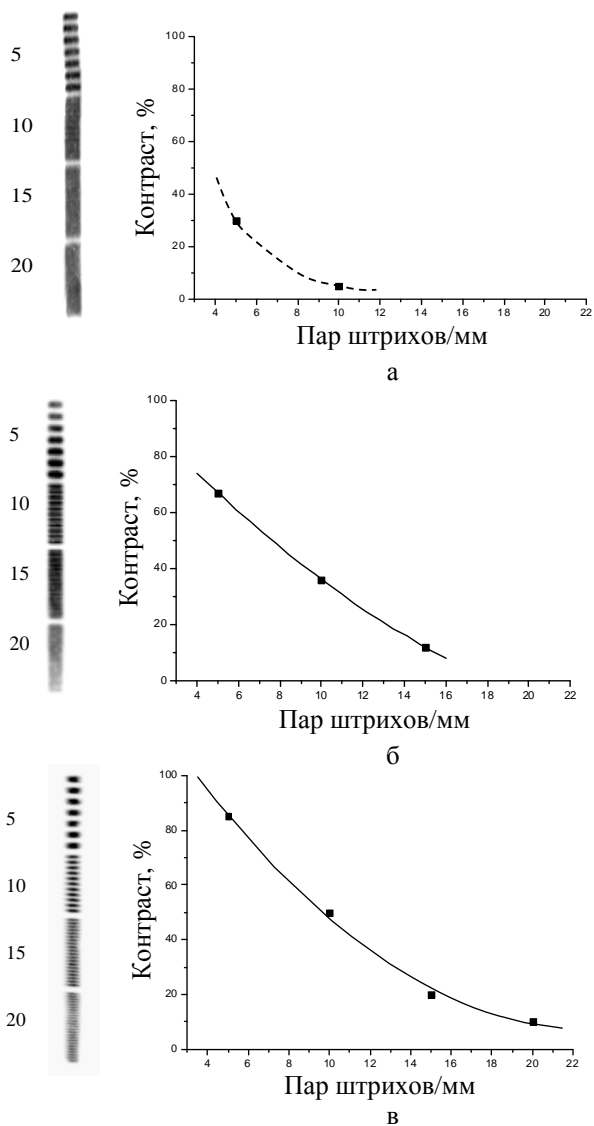


Рис. 4. Щелевая мира (цифры возле рангов щелевой миры указывают число пар штрихов на миллиметр в соответствующих рангах) и частотно-контрастные характеристики фотохронографов с ЭОП: а – ПИМ-112, б – СПО9, в – СПО23

Контраст изображения определялся для каждого значения пространственной частоты по отношению  $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ , где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – максимальное и минимальное значения интенсивности.

Пространственные штрихи на рис. 4,а (ПИМ-112) различаются на первом (5 пар штрихов/мм) и на пределе на втором (10 пар штрихов/мм) полях мира.

Предельное пространственное разрешение камеры с ЭОП ПИМ-112 составило 10 пар штрихов/мм при контрасте 5 %.

Эти данные соответствуют техническим характеристикам, указанным в паспорте электроно-оптической камеры К014.

Предельное пространственное разрешение камеры с ЭОП СПО9 (рис. 4,б) составило 15 пар штрихов/мм при контрасте 12 %.

Предельное пространственное разрешение камеры с ЭОП СПО23 (рис. 4,в) составило 20 пар штрихов/мм при контрасте 10 %.

Из всех исследованных ЭОП трубка СПО23 обладает самым лучшим пространственным разрешением. По входному катоду пространственное разрешение составило  $\leq 50$  мкм. Этот параметр является важнейшим как в методиках диагностики плазмы, так и в диагностиках лазерного излучения. Например, для многоканальной методики измерения формы импульса лазерного излучения с помощью волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) высокое пространственное разрешение позволяет регистрировать на одном приборе большое количество каналов. Размер катода СПО23 –  $3 \times 10$  мм. Для устранения возможных краевых неоднородностей катода по 1 мм от каждого края лучше не использовать. Значит, для размещения ВОЛС можно использовать 8 мм. Диаметр ВОЛС составляет 125 мкм. На катоде в линейку можно поместить  $n = 8/0,125 = 64$  оптоволокон. Из опыта работы на установке «Искра-5» для минимизации взаимовлияния рабочие волокна должны располагаться через одно. Таким образом, на одном ЭОП можно осуществить регистрацию 32 лазерных каналов.

## 2.4. Временное разрешение

По данным разработчиков (БИФО и ВНИИА) предельное временное разрешение ЭОП ПИМ-112 и СПО9 составляет 20 пс. Этот параметр хуже предыдущего поколения фотохронографов разработки ВНИИЭФ СЭР-4 с ЭОП ПИМ-103, составляющего 10 пс.

Для модернизации времяанализирующего ЭОП с целью повышения предельного временного разрешения во ВНИИА была осуществлена разработка новой конструкции ЭОП (СПО23). Была проведена оптимизация конструкции времяанализирующего каскада и повышена напряженность электрического поля (до 5 кВ/мм) в прикатодном узле. При этом по данным разработчиков было достигнуто расчетное физическое временное разрешение 1 пс.

Для проверки временного разрешения был использован макетный вариант ЭОП СПО23, поставленный ВНИИА с мультищелочным фотокатодом S20. Фотохронографическая камера была оборудована быстрой разверткой длительностью 280 пс на экран. Техническое временное разрешение прибора составляло  $\sim 2$  пс.

Короткие импульсы свечения плазмы данным фотохронографом были зарегистрированы в экспериментах по измерению параметров излучения плазменных образований, проводимых на лазерном стенде. В экспериментах осуществлялось облучение алюминиевой мишени цугом лазерных импульсов длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм, длительностью 20 пс с периодом следования 10 нс.

На рис. 5 приведена регистрация свечения алюминиевой плазмы. Свечение плазмы имело пульсирующий характер. Длительность импульсов свечения плазмы составляла 5 пс.



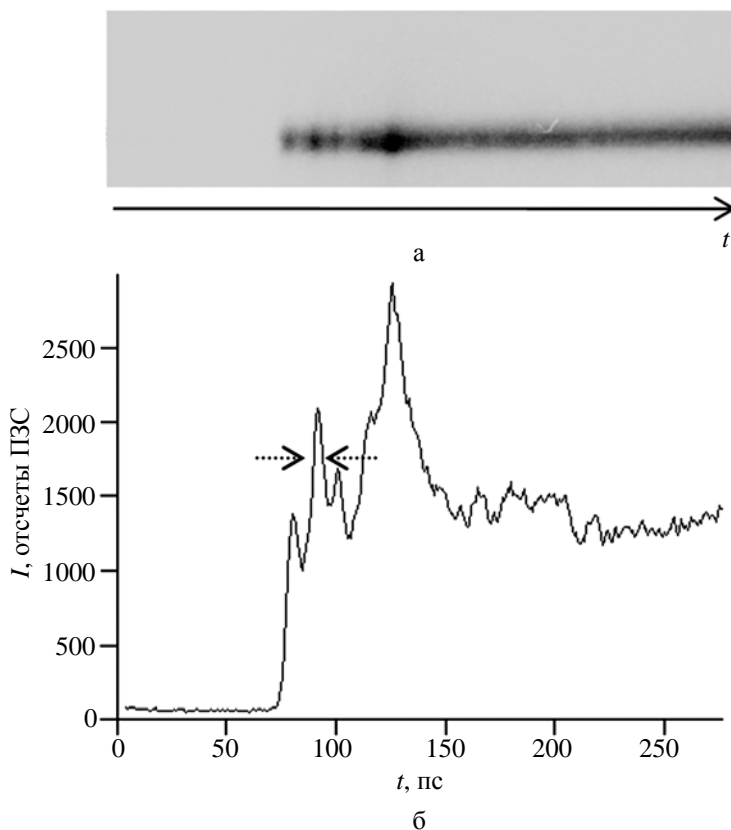


Рис. 5. Фотохронографическая регистрация свечения алюминиевой плазмы на лазерном стенде:  
а – хронограмма свечения мишени; б – временная форма сигнала

Таким образом, было получено, что физическое временное разрешение фотохронографа с ЭОП СПО23 составляет  $\leq 5$  пс.

Сравнение камер с ЭОП ПИМ-112, СПО9 и СПО23 показало, что наиболее близко соответствует требованиям технического задания для установки УФЛ-2М камера с ЭОП СПО23, обеспечивающим следующие основные параметры регистрации:

- временное разрешение  $\leq 5$  пс;
- пространственное разрешение  $\geq 20$  пар штрихов/мм;
- динамический диапазон  $> 1000$ .

На основании этих результатов было принято решение, что при разработке фотохронографов для диагностики плазмы и лазерного излучения следует ориентироваться на конструкцию ЭОП СПО23.

На рис. 6 приведены внешний вид и конструкция ЭОП СПО23.

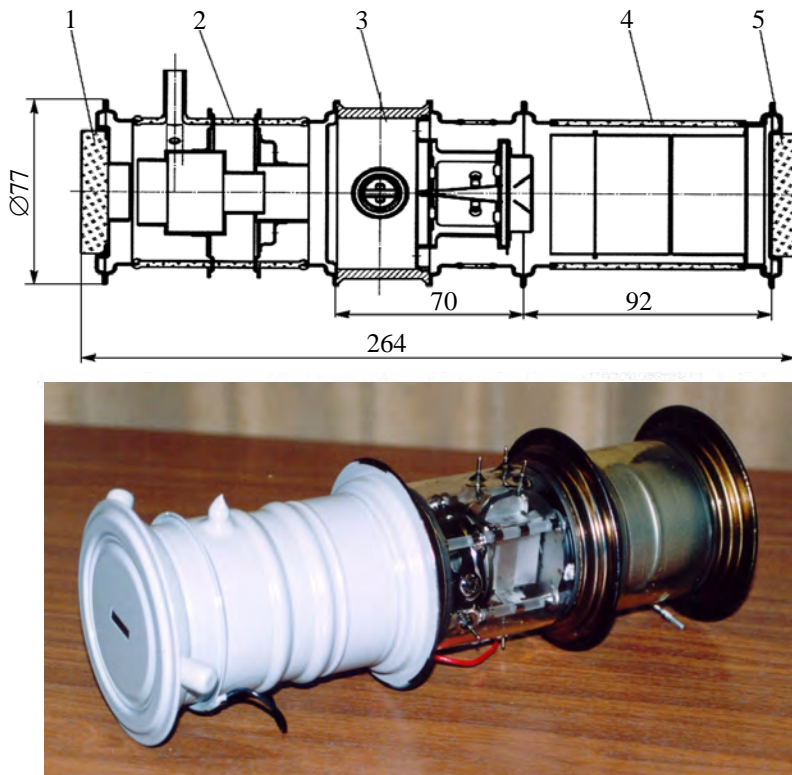


Рис. 6. Конструкция ЭОП СПО23 и его внешний вид: 1 – фотокатод на волоконно-оптической пластине (ВОП); 2 – входная камера ЭОП; 3 – пластины гашения (затворные); 4 – выходная камера ЭОП; 5 – люминесцентный экран на ВОП

### 3. Усилитель яркости

Для разрабатываемой оптической фотохронографической камеры было решено применить ЭОП-усилитель с мультищелочным фотокатодом, оптоволоконным входом и выходом, с усилением на базе микроканальной пластины (МКП).

Наиболее доступным и при этом соответствующим своими техническими характеристиками требованиям разрабатываемой камеры является усилитель яркости ЭПМ-61Г. Прибор применяется в технике в различных наблюдательных и прицельных приборах ночного видения.

#### 3.1. Динамический диапазон и коэффициент усиления ЭПМ-61Г

Измерения динамического диапазона и коэффициента усиления ( $K_{yc}$ ) выполнены с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) СНФТ-3, работающего в режиме интегрирования тока. Фактически фиксировалось полное количество световой энергии, излучаемой всей площадью экрана ЭОП. Источником излучения служила сборка из пяти светодиодов АЛ307А (длина волны излучения  $\lambda = 0,67$  мкм), соединенных последовательно и питаемых от генератора импульсов Г5-54.

Уровень входной энергии задавался длительностью экспозиции. Для определения коэффициента усиления  $K_{yc}$  измерения проводились при разных напряжениях усиления на МКП ( $U_{МКП}$ ). Результаты измерений представлены на рис. 7.

Полученное семейство зависимостей характеризует относительную зависимость  $K_{yc}$  от  $U_{МКП}$  на линейной части кривых. При этом линейный динамический диапазон ЭОП составляет  $DR = 10^4$ .

Для абсолютной привязки были проведены измерения  $K_{yc}$  при  $U_{МКП} = 500$  В. Для этого поочередно регистрировались входной и выходной сигналы с помощью ФЭУ. Измерения показали, что при  $U_{МКП} = 500$  В коэффициент усиления  $K_{yc} = 10$ .

Результирующая зависимость  $K_{yc}$  от  $U_{МКП}$  приведена на рис. 8. Из полученной зависимости видно, что при максимально допустимом напряжении в статическом режиме питания  $U_{МКП} = 1000$  В имеем  $K_{yc} = 5 \cdot 10^4$ . Импульсное питание МКП позволяет поднять  $U_{МКП}$  до 1200 В, при этом  $K_{yc} \geq 10^5$ .

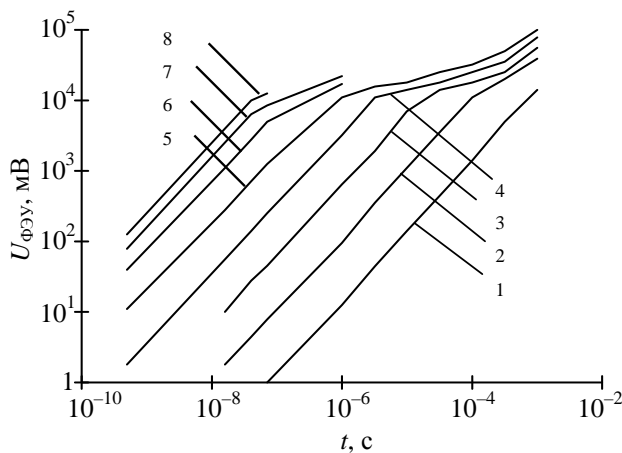


Рис. 7. Зависимость сигнала ФЭУ от длительности экспозиции при различном напряжении на МКП, В: 1 – 500, 2 – 600, 3 – 700, 4 – 800, 5 – 900, 6 – 1000, 7 – 1100, 8 – 1200

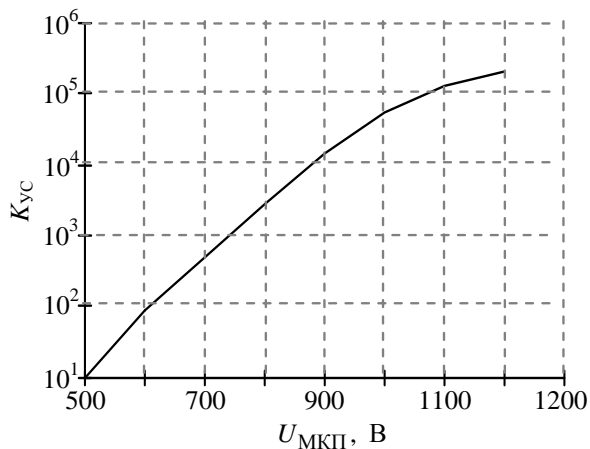


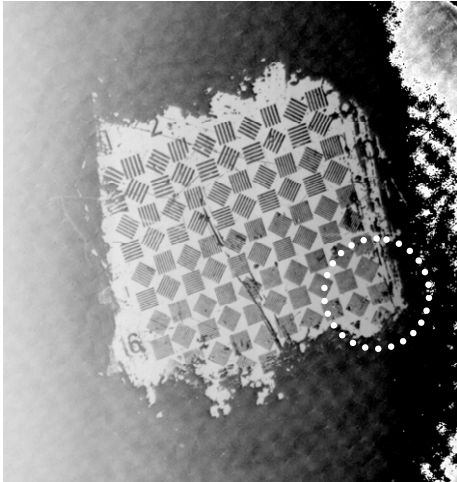
Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления от напряжения на МКП

### 3.2. Пространственное разрешение

Проверка пространственного разрешения усилителя яркости ЭПМ-61Г была проведена совместно с ПЗС-считывающим устройством. Усилитель и ПЗС были установлены контактно. На катоде усилителя контактно установлена мира ГОИ № 4. Полученные изображения миры приведены на рис. 9.

Предельное пространственное разрешение при контрасте 10 % составило 25 пар штрихов/мм (25-е поле миры № 4).

Мира № 4



25-е поле

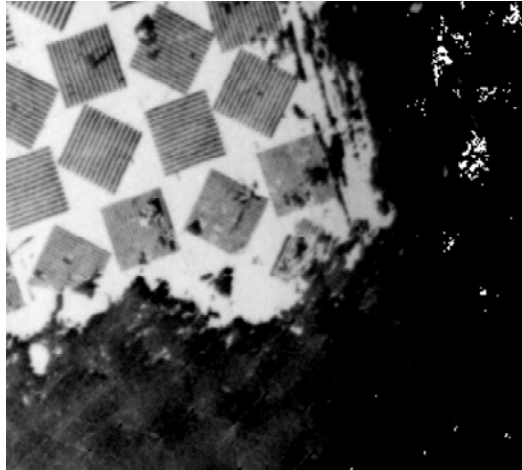


Рис. 9. Изображение миры ГОИ № 4

## 4. Устройство съема информации

### 4.1. Технические характеристики ПЗС-камеры

В фотохронографе СЭР-4 в ряде исполнений в качестве устройства записи информации применялась ПЗС-камера СИР-05М, разработанная совместно ВНИИЭФ и новгородским предприятием «Электра».

Работа по совершенствованию устройства записи информации для фотохронографов продолжается. В настоящее время по техническому заданию ВНИИЭФ специально для фотохронографов производятся ПЗС-камеры с улучшенными характеристиками S2C-017 APF компанией «Силар» (С.-Петербург). Ее технические характеристики следующие: входное окно – ВОП; число эффективных пикселей  $1040 \times 1160$ , размер пикселя  $16 \times 16$  мкм; сигнал насыщения – 16000 отсчетов; спектральный диапазон чувствительности – 200–1080 нм; оцифровка – 14 бит/пиксель; динамический диапазон – 2000; питание +24 В, 0,5 А; габариты  $100 \times 88 \times 80$  мм.

### 4.2. Пространственное разрешение ПЗС-камеры S2C-017 APF

Проверка пространственного разрешения была проведена с помощью миры ГОИ № 3. Мира была установлена контактно с ВОП-входом ПЗС-камеры. Подсветка осуществлялась белым светом. Полученное изображение миры № 3 приведено на рис. 10.

Предельное пространственное разрешение ПЗС-камеры составило 30 пар штрихов/мм (16-е поле миры № 3) при контрасте 5 %.

16-е поле миры № 3:

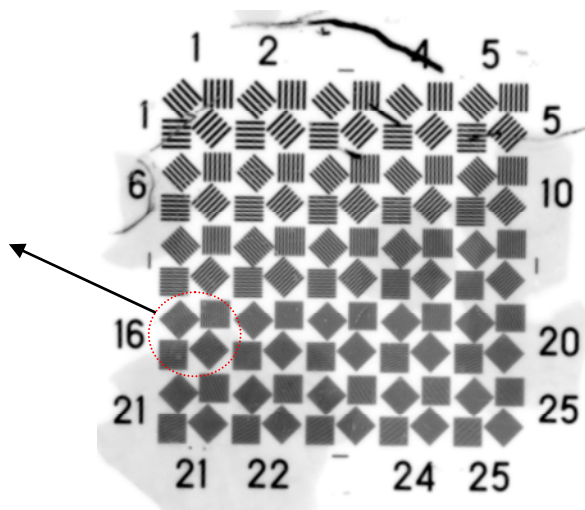
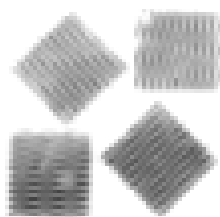


Рис. 10. Изображение миры ГОИ № 3, полученное с помощью ПЗС-камеры S2C-017 APF

### 5. Модернизация системы управления и питания

В разрабатываемой фотохронографической камере штатные источники высоковольтного питания собственной разработки, применяемые в регистраторе СЭР-4, заменены на импортные блоки. Эти блоки имеют более высокий КПД, на порядок лучшие характеристики по стабилизации, пульсациям и габаритам. Это позволило улучшить пространственное разрешение регистраторов и стабилизировать яркостные характеристики регистрируемых изображений.

Практика диагностики по методике измерения скорости ударной волны показала необходимость внесения дополнительного усовершенствования в штатную схему регистратора. Быстрое сквозное прогорание мишени (через 20 нс) приводило к сильной фоновой подсветке хронограммы из-за рассеяния электронов внутри колбы. Для устранения этого эффекта в конструкцию фотохронографа введен блок гашения, который через 15 нс после срабатывания развертки подает на специальные пластины гашения импульс амплитудой 300 В и длительностью  $\approx 1$  мс, и электронный луч уводится в ловушки. Тем самым осуществляется полное запираение времяанализирующего каскада фотохронографа на все время существования плазменного образования, в частности на время обратного хода развертки.

Для устранения нелинейности развертки и повышении точности измерения временных задержек был доработан блок электронной развертки. Модернизация заключалась в увеличении амплитуды импульса напряжения, подаваемого на схему формирования пилообразного импульса развертки, и более тщательном подборе хранирующих  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -элементов в цепи его формирования.

Управление режимами работ камеры осуществляется от компьютера по ВОЛС.

## 6. Работа фотохронографической камеры с ЭОП СПО23

### 6.1. Подготовка фотохронографа

Для проверки характеристик камеры и последующего проведения измерений параметров лазерного излучения с целью разработки измерительных методик для строящейся установки УФЛ-2М был подготовлен рабочий макет фотохронографа на базе ЭОП СПО23.

### 6.2. Подготовка блока электронной развертки

Калибровка скорости временной развертки, нелинейности развертки и задержки запуска были проведены с помощью YAG(Nd)-лазера на длине волны 527 нм и длительностью импульса 25 пс.

На рис. 11 представлена схема стенда для калибровки временных параметров прибора.

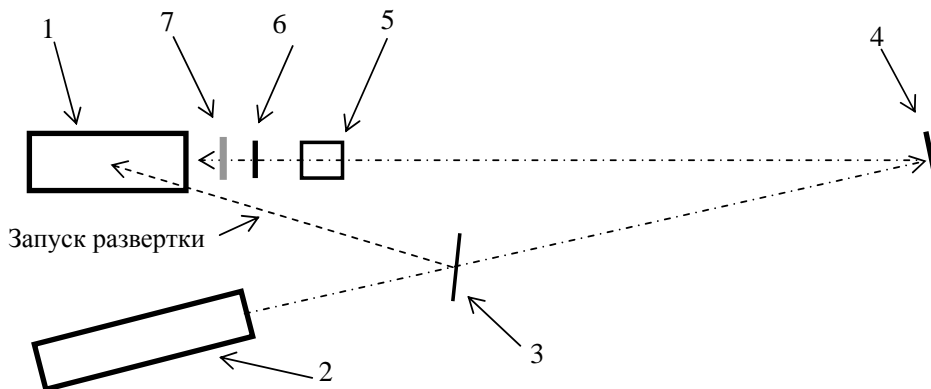


Рис. 11. Схема измерения скорости и задержки срабатывания развертки фотохронографа:  
1 – фотохронограф; 2 – лазер; 3 – расщепляющая пластина; 4 – поворотное зеркало;  
5 – эталон Фабри – Перо; 6 – ослабляющие светофильтры; 7 – матовое стекло

Калибровка развертки осуществляется методом регистрации лазерного импульса, размноженного в серию с заданным периодом с помощью эталона Фабри–Перо 5. Расщепляющая пластина 3 служит для отвода части лазерного импульса с нужным упреждением на запуск развертки фотохронографа 1. Для устранения влияния пространственно-временных неоднородностей в распределении ближней зоны излучения на калибровку производится «замешивание» лазерного пучка с помощью матового стекла 7. Для устранения возможных статистических выбросов и более подробного анализа всей трассы развертки скорость и нелинейность развертки определяются по нескольким десяткам калибровочных кадров. В данной схеме также определялась периодическая нестабильность задержки развертки (джиттер) по разбросу попадания единичного сигнала лазерного импульса на трассе развертки при неизменных условиях эксперимента.

В качестве эталонной задержки была использована пластина из стекла К8 толщиной 10,5 мм. Период обхода света лазера по нормали в ней составлял 106,5 пс.

На рис. 12 приведены хронограммы лазерного излучения, полученные на разных участках развертки. В качестве критерия определения временной координаты импульса брался центр фронта – T05F. В обработку были включены кадры (несколько десятков), полученные по всей длине развертки. Каждый кадр обрабатывался в разных сечениях по высоте для учета дисторсионных искажений при обработке эопограмм.

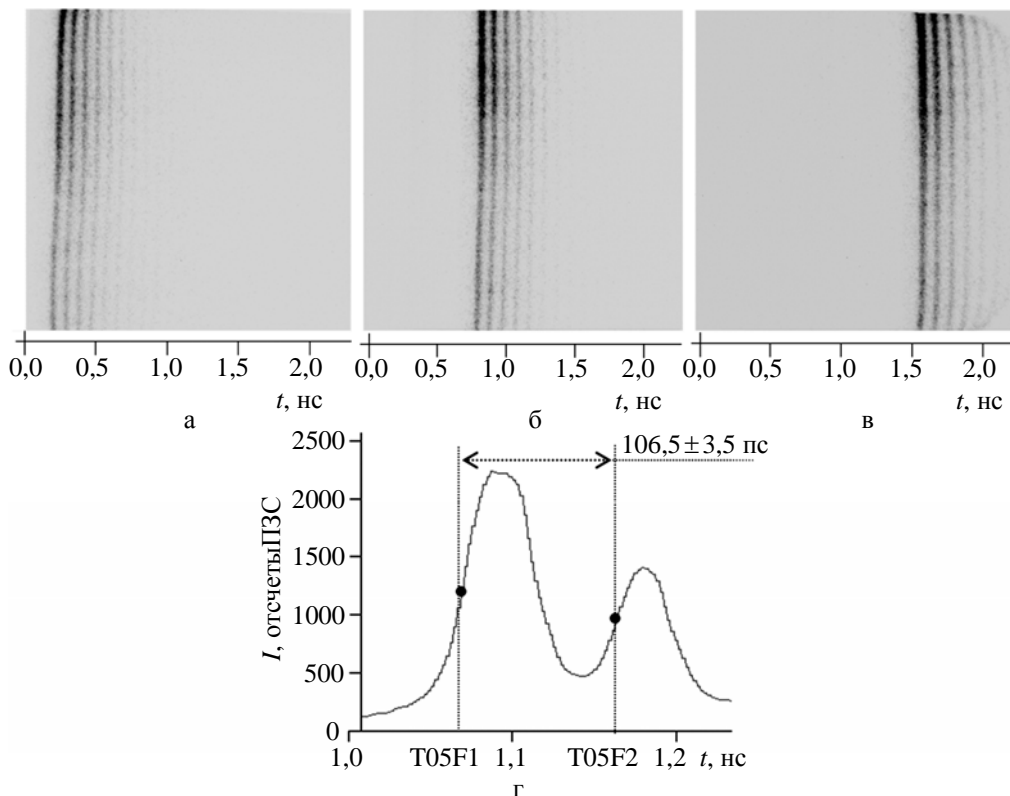


Рис. 12. Хронограммы лазерного излучения длительностью 25 пс, разложенного в серию с помощью эталона Фабри – Перо с периодом 106,5 пс: а, б, в – соответственно начало, середина, конец развертки; г – временная форма лазерного излучения

В результате обработки получилась подробная зависимость скорости развертки от координаты на экране (рис. 13).

Длительность подготовленной развертки составила 2,3 нс на экран.

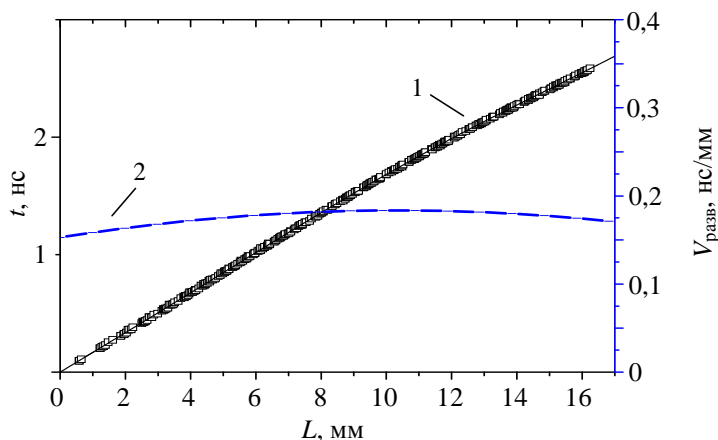


Рис. 13. Временные параметры развертки фотохронографа: 1 – диаграмма перевода пространственной координаты по экрану во временную; 2 – скорость развертки по экрану

### 6.3. Проверка погрешности измерения интервалов времени

Проверка погрешности измерения интервалов времени была проведена на стенде (см. рис. 11). Проводилась процедура, обратная измерению скорости развертки. По известной скорости развертки обрабатывались кадры (тоже несколько десятков), не включенные в расчеты скорости развертки.

По отклонению измеренных задержек от заданной с помощью эталона определялась аппаратная точность измерения интервалов времени между фронтами импульсов. Отклонение измеренных задержек между импульсами от эталонной составило от 0 до 3,5 пс.

Таким образом, было показано, что аппаратная погрешность измерения временных задержек между импульсами для регистратора с разверткой 2,3 нс на экран составила  $\pm 4$  пс.

### 6.4. Апробация камеры в экспериментах на установках «Искра-5» и ЛУЧ

Макетный вариант камеры с ЭОП СПО23 прошел апробацию в экспериментах на установках «Искра-5» и ЛУЧ. Так, например, на рис. 14 приведен результат регистрации выхода ударной волны из Си- и Al-образцов при исследовании ударной сжимаемости веществ. Давление в меди составило 7,7 Мбар, в алюминии – 4,3 Мбар.

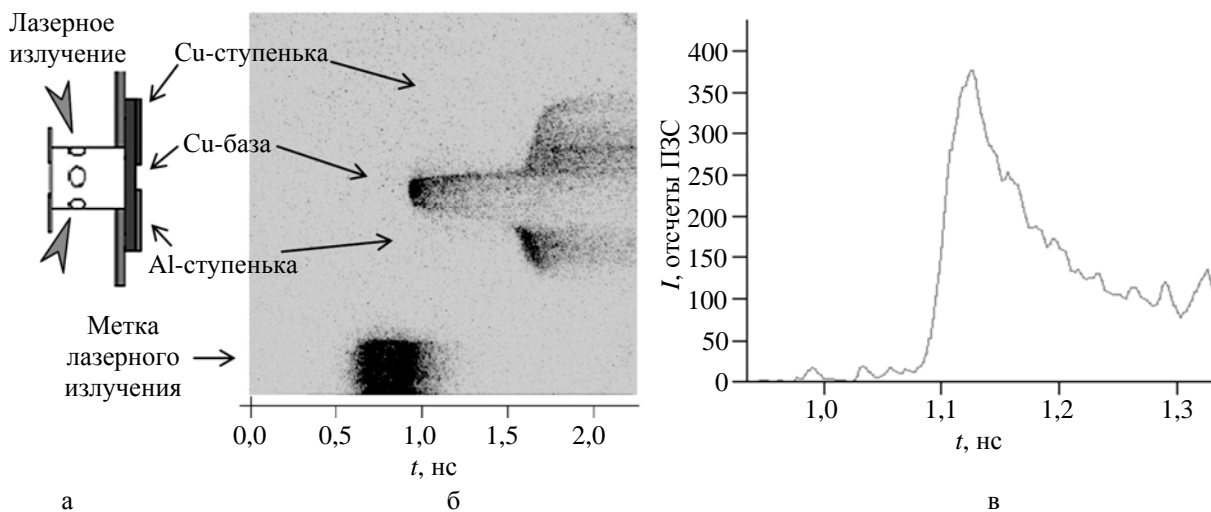


Рис. 14. Щелевая фотохронограмма сигналов ударной волны Си-базы, Al- и Си-ступенек: а – мишень, б – рабочий кадр, в – форма сигнала ударной волны Си-базы с фронтом  $\leq 30$  пс

На рис. 15 приведен пример регистрации до уровня  $10^7$  глубокого фронта лазерного импульса, осуществленной с помощью того же макета фотохронографа.



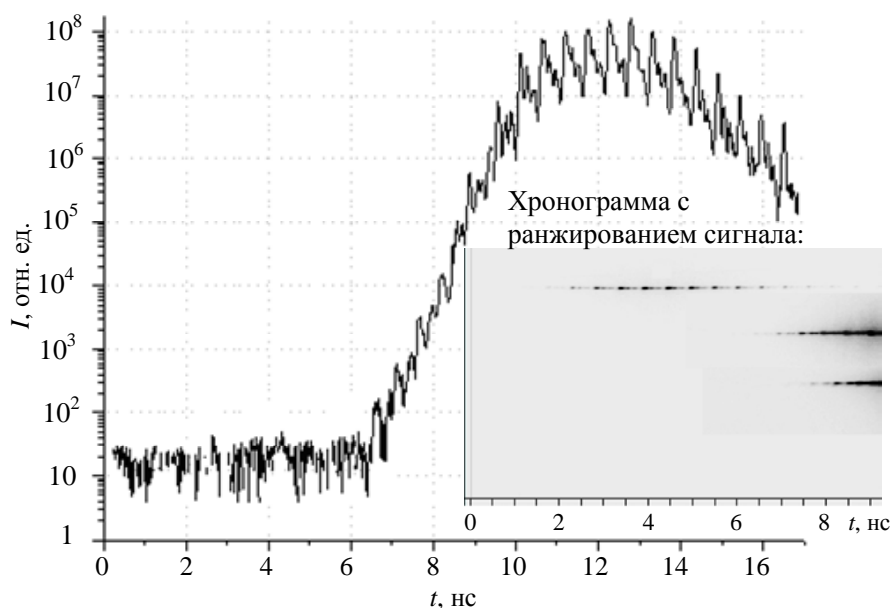


Рис. 15. Результат восстановления глубокого фронта лазерного импульса

## Заключение

Выработаны новые требования к базовой части фотохронографа – времяанализирующему ЭОП и намечены пути улучшения его характеристик для решения задач повышения динамического диапазона регистрации, пространственного и временного разрешения.

Проведены исследования характеристик ЭОП ПИМ-112 (производства компании БИФО), СПО9 и СПО23 (производства ВНИИА).

Сравнение камер с данными ЭОП показало, что наиболее близко соответствует требованиям технического задания для установки УФЛ-2М камера с ЭОП СПО23.

Проведены исследования характеристик нового усилителя яркости ЭПМ-61Г и устройства съема информации ПЗС-камеры S2C-017 APF.

Полностью модернизированы система управления и питания прибора:

- разработана новая плата питания;
- разработан новый блок управления;
- введен дополнительный блок гашения;
- изменен блок временной развертки.

В результате проведенных работ был подготовлен рабочий макет модернизированного оптического фотохронографа в составе:

- время анализирующего ЭОП СПО23;
- усилителя яркости ЭПМ-61Г;
- считывающего устройства ПЗС-камеры S2C-017 APF;
- обновленных блоков питания и управления.

В результате проведенной модернизации создан новый базовый фотохронографический комплекс (СЭР-5), обеспечивающий следующие основные характеристики:

- предельное временное разрешение  $\leq 5$  пс;
- пространственное разрешение  $\geq 20$  пар штрихов/мм;
- динамический диапазон  $\geq 1000$ ;
- количество измерительных каналов в одном приборе – до 32.

Макетный вариант камеры с ЭОП СПО23 прошел апробацию в экспериментах на установках «Искра-5» и ЛУЧ.

С помощью данного регистратора были успешно проведены измерения сигналов ударных волн в ходе исследований ударной сжимаемости веществ. Погрешность измерения временных задержек сигналов составила до  $\pm 4$  пс.

На базе данного регистратора была отработана методика измерения глубокого фронта лазерного импульса. Динамический диапазон методики составил до  $10^7$ .

### Список литературы

1. Воронцов Е. Н., Кирдяшкин М. Ю., Кравченко А. Г. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 10. С. 994.
2. Муругов В. М., Окутин Г. П., Петров С. И., Панкратов В. И. // ПТЭ. 1993. № 2. С. 155.
3. Бельков С. А., Кравченко А. Г., Кунин А. В. и др. // ПТЭ. 2006. № 2. С. 150.
4. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. – М.: Радио и связь, 1988.

### Streak Cameras for Laser Fusion Experiments

D. S. Kornienko, A. G. Kravchenko, D. N. Litvin, V. V. Mis'ko, A. N. Rukavishnikov,  
A. V. Senik, K. V. Starodubtsev, V. M. Tarakanov, A. E. Chaunin

*Results of the streak camera development for the new laser facility UFL-2M are presented. This streak camera can be used for diagnosing laser beams and plasma parameters. Its main characteristics are as follows: the maximum temporal resolution is  $\leq 5$  ps, the spatial resolution is  $\geq 20$  line pairs/mm, and the dynamic range is  $\geq 1000$ .*