

Разработка и испытания фемтосекундной камеры K009

В.Б. Лебедев, А.Н. Машковцев, Г.Г. Фельдман

Приведен обзор работ по созданию электронно-оптических камер фемтосекундного диапазона и результаты разработки камеры K009. При её испытаниях были зарегистрированы импульсы длительностью 150фс.

Ключевые слова: *электронно-оптический преобразователь, камера, временное разрешение, развёртка, фемтосекундный лазер.*

The review of works on image converter cameras of femtosecond range creation and results of K009 designing is presented. The pulses with 150fs duration were recorded when this camera was tested.

Key words: *image converter tube, camera, temporal resolution, sweep, femtosecond laser.*

Введение

Сегодня около десятка компаний в мире, среди которых есть крупные, средние и мелкие, выпускают разнообразные электронно-оптические камеры. Наиболее крупными, поделившими между собой значительную часть мирового рынка, являются японская компания Хамамацу, английская Хэдланд Фотоникс и французская Томсон-CSF.

За последние 25-30 лет в научно-технической литературе опубликована масса работ по применению камер не только для получения феноменологической информации о регистрируемых процессах, но и для получения измерительной информации, такой, как характерные пространственные и характерные временные интервалы, относительные, а иногда даже и абсолютные интенсивности сигналов, длительности сигналов и др.. Опубликовано большое количество работ по измерению метрологических параметров камер. При этом разброс одноименных параметров для однотипных камер, построенных на однотипных времяанализирующих электронно-оптических преобразователях (ЭОП), являющихся первичным звеном в цепи из нескольких измерительных преобразователей различного вида, традиционно используемых в

электронно-оптическом тракте камер, чрезвычайно велик. Так, данные по такому важнейшему параметру, как линейный динамический диапазон, разнятся в десятки – сотни раз, чего в принципе быть не должно. Но практически ни один производитель камер, указывая в документации, придаваемой к камерам, те или иные их метрологические параметры, часто далеко не полные, не приводил никаких сведений о гарантированных погрешностях измерений, обеспечиваемых их камерами.

Исключением здесь являлся ВНИИ оптико-физических измерений.

Созданное в начале 80-х годов 20-го века во ВНИИОФИ метрологическое обеспечение различных моделей пикосекундных электронно-оптических камер серии Агат в виде поверочной установки высшей точности, разработчиком и учёным хранителем которой был Г.В. Колесов, позволило впервые в мире гарантировать для этих камер нормированные погрешности измерения пространственных и временных интервалов, а также длительностей оптических импульсов в пико-наносекундном диапазоне времени.

1. Обзор истории вопроса и концепция разработки камеры К009

В 1980 г. на 14-м Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии и фотонике в Москве специалистами ВНИИОФИ было сообщено о регистрации с помощью экспериментальной камеры Агат-04М впервые в мире лазерных импульсов длительностью от 200 до 300 фс на длине волны 1060 нм [1], причём с высоким контрастом – от 40 до 60% (рис.1.1 и 1.2).

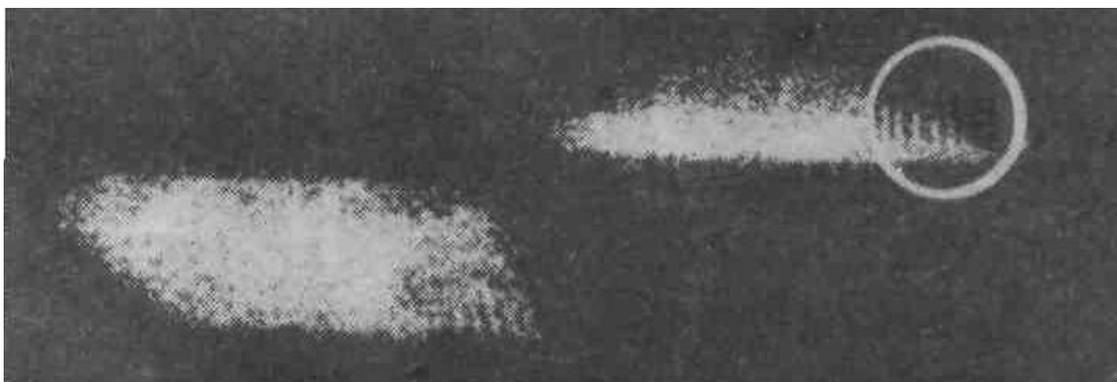


Рис.1.1. Фотохронограмма лазерного импульса с фемтосекундной временной структурой, обведённой кружком, записанная камерой Агат-04М. Верхняя часть расщеплённого импульса задержана относительно нижней на 27 пс.

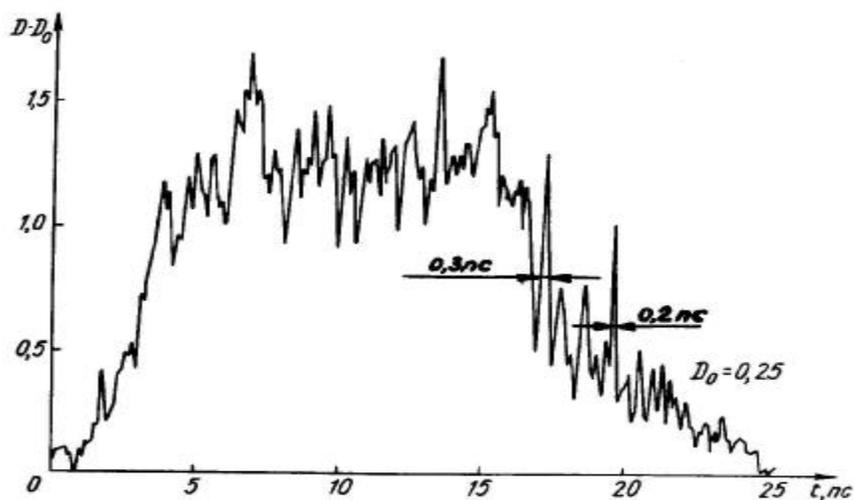


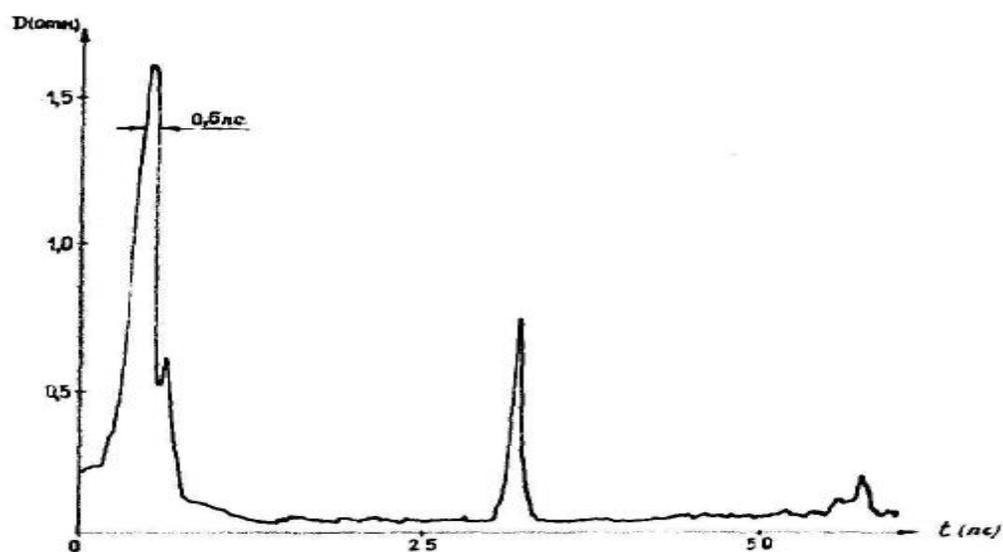
Рис.1.2. Денситограмма верхней части импульса, представленного на рис.1. Импульсы длительностью 0,3 и 0,2 пс – это 1-й и 4-й пички в кружке на рис.1, разрешённые с контрастом 40% и 60% соответственно.

Полная ширина спектра излучения этого лазера составила 9нм, чему в предположении гауссовой формы импульсов соответствует их минимальная длительность 0,2 пс [2]. С помощью этой же камеры были зарегистрированы импульсы суперфлуоресцентного лазера на Родамине-6Ж длительностью 0,6

пс [3], но уже в более коротковолновой области спектра на длине волны 590 нм (рис.1.3).



а



б

Рис.1.3. Фотохронграмма (а) импульса суперфлуоресцентного лазера на Родамине-6Ж ($\lambda = 590$ нм), размноженного в интерферометре Фабри-Перо с периодом 26 пс, и её денситограмма (б).

В период с 1980 г. по 1986 г. во ВНИИОФИ было разработано и выпущено ещё 4 образца подобных камер (Фемтохрон-2шт, Позитрон-1шт, Селена-2-1шт), совершенствовавшихся от модели к модели [4]. При этом в камере Селена-2 была обеспечена и по сей день самая высокая в мире скорость развертки (графическая скорость электронного луча на экране времяанализирующего ЭОП), равная 7-ми скоростям света, необходимая для

достижения предельного временного разрешения 100 фс. Отсутствие в то время доступных соответствующих фемтосекундных лазеров не позволило определить реальное временное разрешение этой камеры. Однако с позиций сегодняшних представлений о факторах, ограничивающих временное разрешение электронно-оптического метода регистрации, и имея в виду, что прикатодная напряжённость поля времяанализирующего ЭОП в этой камере составляла, как и в камере Агат-04М, 3 кВ/мм, можно предполагать, что её предельное временное разрешение вряд ли могло быть выше (лучше) чем у Агат-04М и то только вблизи длинноволновой границы внешнего фотоэффекта, по крайней мере, на длине волны 1060 нм. Но разработанная тогда отклоняющая система развёртки электронного луча во времяанализирующем ЭОП ПВ-006М и генератор развёртки на основе газонаполненного разрядника РГЛ-2 с лазерным запуском, а во втором экземпляре камеры “Фемтохрон” на основе полупроводникового коммутатора с пикосекундной стабильностью срабатывания также с лазерным запуском [5] позволяли, сделав следующий шаг, заключающийся в увеличении до 10 кВ/мм прикатодной напряженности поля в ЭОП, достичь предельного временного разрешения в 100 фс.

К сожалению, негативные явления в экономике, возникшие в СССР в ходе начавшейся перестройки народного хозяйства, не позволили сделать этот последний и решающий шаг. Многочисленные потребители электронно-оптической аппаратуры абсолютно все и сразу стали неплатёжеспособными. Выпуск ЭОП и разработка экспериментальных образцов новых типов камер и ЭОП, всегда осуществлявшиеся во ВНИИОФИ, практически прекратились. Серийный выпуск камер на заводе в Смоленске был прекращён. Коллектив сотрудников ВНИИОФИ, работавших по тематике электронно-оптического приборостроения, насчитывавший ранее около тысячи человек, сократился до двух десятков. Указанная поверочная установка высшей точности за невостребованностью была упразднена и уничтожена, электронно-

оптическая тематика практически свёрнута, а лидерство в создании фемтосекундных камер, естественно, утрачено.

Что касается наших зарубежных конкурентов, не стоявших в это время на месте, то японская компания Хамамацу лишь в начале 90-х годов смогла разработать камеру FESCA-500 с предельным временным разрешением 500 фс, а в 1995г камеру FESCA-200, обеспечивавшую при напряженности поля у фотокатода ~ 10 кв/мм разрешение 200 фс. Скорость развертки в FESCA-200 была в 4 раза ниже чем в нашей камере “Селена-2” 1985 года выпуска.

В 1993г английская компания Хэдланд Фотоникс выпустила пилотный проспект о разрабатываемой камере IMACON-300FS с предельным временным разрешением 300 фс, а через два года сообщила о завершении её разработки.

За ~ 15 лет, прошедших с момента указанного вынужденного прекращения во ВНИИОФИ интенсивных разработок фемтосекундных камер, лазерная техника уверенно освоила фемтосекундный диапазон. Наиболее широко во всём мире для измерения длительности фемтосекундных оптических импульсов используется автокорреляционный метод в различных его интерпретациях. Он сравнительно прост. Но ему присущ целый ряд недостатков. Главный из них заключается в том, что априори предполагается, что фаза оптических колебаний в измеряемых импульсах линейно изменяется во времени, то есть отсутствует так называемый «чирп»-эффект. Реально же это может быть не так, поскольку отсутствие «чирп»-эффекта мало кто контролирует из-за сложности этой процедуры, и тогда ошибка измерений может оказаться очень большой. Поэтому этот метод и является косвенным, а не прямым. Единственным на сегодняшний день прямым методом измерения параметров оптических импульсов в этом временном диапазоне по-прежнему является электронно-оптический метод. Поэтому интерес к нему не ослабевает и работы по созданию камер с предельным временным разрешением, приближающимся к физическому пределу этого метода, продолжаются во всём мире и, наконец,

благодаря поддержке Министерства Науки, Промышленности и Технологии, реально возобновились в России. Настоящая камера разрабатывалась по техническому заданию этого министерства.

Теоретические исследования процессов, происходящих во время анализирующем ЭОП (в каждом из его элементов), в той или иной мере влияющих на его предельное временное разрешение, начались с момента создания в Советском Союзе в 1949 году М.М. Бутсловым первого в мире ЭОП типа ПИМ-3 с развёрткой изображения электрическим полем. К концу 70-х годов с точки зрения теории почти всё было известно и предсказано и многое подтверждено практически [6]. Оставалось только преодолеть технологические проблемы в создании сверхвысокой напряжённости электрического поля у катода ЭОП и схемотехнические в обеспечении сверхсветовой скорости развёртки электронного изображения в ЭОП. Как было отмечено выше, к 1986 году, схемотехнические проблемы генераторов импульсов для сверхбыстрой развёртки электронного луча во время анализирующих ЭОП, а также проблемы создания самих отклоняющих систем развёртки в ЭОП, во ВНИИОФИ были решены. К 1990 году удалось решить и проблему повышения напряжённости поля у фотокатода. В [7] было показано, что для фотокатодов типа S-20 реально достижима импульсная напряженность 18 кВ/мм. Но на этом процесс движения вперёд был существенно замедлен на полтора десятилетия из-за экономических осложнений, возникших в ходе перестройки народного хозяйства.

После такого длительного застоя пришлось вспоминать, что и как было сделано в середине 80-х годов. Выяснилось, что, к сожалению, конструкторская документация на использовавшийся в камере Селена-2 ЭОП ПВ-006М с укороченной и асимметричной относительно оси ЭОП отклоняющей системой развёртки, полностью утеряна, не говоря уже о технологической оснастке для сборки этого ЭОП. Теперь многое предстояло начать сначала – выбрать оптимальные фокусирующую систему и систему

развёртки, а главное увеличить напряжённость поля у фотокатода действующего образца ЭОП до не менее 10 кВ/мм.

В 1996 году при разработке фемтосекундной камеры для мягкого рентгена [8] при испытаниях времяанализирующего ЭОП ПВ-51Р удавалось довести импульсную напряжённость поля у цезий-йодных фотокатодов до 40 кВ/мм. Нарботка составляла 1000 импульсов. При этом не было ни пробоев, ни намёков на них. Правда, для надёжности камеры напряжённость поля у фотокатода ЭОП была снижена до 30 кВ/мм.

Среди отечественных работ последнего времени, опубликованных по этой тематике, следует отметить [9], в которой сообщалось об экспериментальной электронно-оптической установке (не промышленной камере) с предельным временным разрешением 200 фс при напряжённости поля 13 кВ/мм у кислородно-цезиевого фотокатода.

Итак, элементная база управляющей электроники, формирующей импульсы сверхскоростной развёртки, использовавшаяся нами в 80-х годах прошлого века и опиравшаяся на газонаполненные разрядники с лазерным запуском или высоковольтные полупроводниковые коммутаторы также с лазерным запуском, требовавшие для их запуска энергию лазерных импульсов соответственно порядка 10^{-5} и 10^{-4} Дж [10], к сегодняшнему дню во многом стала уже неприемлемой. Дело в том, что серийно выпускаемые и широко применяемые в настоящее время фемтосекундные лазеры имеют энергию в одиночном импульсе порядка нескольких наноджоулей. С помощью усиления можно увеличить их энергию на 2-3 порядка, что всё равно оказывается как минимум на порядок недостаточным для нормальной работы разрядника и на 2 порядка недостаточным для полупроводникового коммутатора. Дальнейшее усиление энергии лазера возможно, но оно влечёт за собой проблемы как технического, так уже и экономического плана – это сложно и, главное, дорого. Хотя в [11] для того, чтобы обеспечить работу рентгеновской стрик камеры в режиме накопления изображения многократных развёрток при их временной нестабильности, так называемом

(джиттере), не более 1-2 пс, использовали именно полупроводниковый коммутатор. Правда, фемтосекундный лазер (50 фс), который при его фокусировке на мишень инициировал мягкое рентгеновское излучение, имел весьма высокую энергию 75 мДж. Это случай, можно сказать, исключительный. Только немногие научные центры могут себе такое позволить. Повторим, что далеко не всегда энергии обычного фемтосекундного лазера достаточно для указанного выше оптического запуска камеры. Поэтому прежде всего фемтосекундная камера должна иметь запуск электрическим импульсом. В этой связи необходимо было найти высоковольтные быстродействующие коммутаторы с электрическим запуском, позволяющие формировать парафазные симметричные импульсы с амплитудой не менее 5 кВ, с фронтом не более 0,2 нс, обладающие к тому же малым джиттером (малой нестабильностью задержки относительно запускающего импульса), не превышающим 10-20 пс.

Как известно [6, 10], очень важным аспектом в создании камеры является архитектура её электронно-оптического тракта. Тракт должен иметь такой коэффициент усиления изображения после его развёртки, чтобы система регистрации изображения на выходе тракта обеспечивала его надёжную запись при таком количестве фотоэлектронов в элементах пространственного разрешения на фотокатоде времяанализирующего ЭОП, при котором кулоновское расталкивание электронов не будет ограничивать предельное временное разрешение камеры.

Сложившаяся совершенно новая ситуация в стране после перестройки и возникшие рыночные отношения заставили пересмотреть и концепцию создания новой электронно-оптической аппаратуры.

Основой новой концепции стали следующие принципы:

- минимальные трудоёмкость и себестоимость разработки и производства аппаратуры при её высоких технических и эксплуатационных характеристиках, включая надёжность, обеспечивающих высокую

конкурентную способность этой аппаратуры на отечественном и мировом рынках;

- гибкая конструктивная и схемотехническая архитектура камер, которая позволяла бы легко проводить адаптацию камер под специфические требования потребителей, а также модернизацию по мере совершенствования радиоэлектронной и электровакуумной элементной базы.

В соответствии с этой концепцией и велась разработка фемтосекундной камеры К009.

2. Вопросы разработки времяанализирующего ЭОП

Времяанализирующий ЭОП имеет две основные части: электронно-оптическую фокусирующую систему и систему развертки электронного луча. Методика расчета фокусирующей системы с электростатической фокусировкой была хорошо нами отработана ранее и обеспечивала достаточную точность, необходимую для изготовления электродов фокусирующей системы.

Известно [6], что величина временного разрешения обратнопропорциональна напряженности электрического поля вблизи фотокатода и прямопропорциональна разбросу начальных скоростей фотоэлектронов. В своё время при разработке ЭОП для камеры, предназначенной для регистрации мягкого рентгеновского излучения [8] мы выбрали четырехэлектродную фокусирующую систему, которая имеет хорошее пространственное и временное разрешение. Вблизи фотокатода была достигнута напряженность электрического поля 30 кВ/мм. Это обеспечивало получение временного разрешения 800 фс.

Сегодня считается, что реальное предельное временное разрешение ограничивают 3 основных фактора:

- а) временной разброс выхода фотоэлектронов из толщи фотокатода,
- б) разброс начальных скоростей фотоэлектронов,
- в) кулоновское расталкивание электронов из-за большой плотности тока.

В случае нашей камеры кулоновское расталкивание электронов (фактор «в») можно не учитывать, так как установленные после времяанализирующего ЭОП два усилителя развёрнутого изображения позволяют в пределе регистрировать единичные фотоэлектроны, вышедшие с фотокатода.

В отношении факторов «а» и «б» нужно сказать, что времяанализирующий ЭОП для оптического диапазона с фотокатодом S-20 в сравнении с ЭОП для рентгеновского диапазона с фотокатодом CsJ обладает большими преимуществами, заключающимися в следующем:

а) фотокатод S-20 имеет толщину 100-150 ангстрем (в 3-4 раза меньшую чем у CsJ), что определяет временную дисперсию выхода фотоэлектронов из фотокатода S-20, заведомо меньшую 100 фс [6];

б) разброс начальных энергий фотоэлектронов для CsJ составляет ~2 эВ, а для S-20 ~0,3 эВ (разница – почти в 7 раз). Это значит, что при равных напряженностях электрического поля вблизи фотокатода временная дисперсия из-за разброса начальных энергий фотоэлектронов, ограничивающая временное разрешение ЭОП, для S-20 будет меньше чем для CsJ примерно в $\sqrt{7} = 2,65$ раза (скорость пропорциональна корню квадратному из энергии).

Проблема заключается в том, что фотокатод видимого диапазона не может быть сменным. Он не может существовать вне вакуума. Поэтому в случае электрического пробоя из-за высокой напряженности электрического поля у фотокатода ЭОП будет испорчен. В случае открытого рентгеновского ЭОП фотокатод можно заменять.

Учитывая вышеизложенное и проведя многочисленные эксперименты по определению импульсной электропрочности промежутка ускоряющий электрод-фотокатод S-1 и S-20, мы пришли к выводу, что для надёжности не стоит иметь напряженность электрического поля у этих фотокатодов существенно большей 10-12 кВ/мм.

Сферизация подложки фотокатода необходима для исключения С-образных искажений изображения щели вследствие неизохронности электронной фокусирующей системы [10]. Непроходная коаксиальная отклоняющая система позволяет за счёт отражения волны от разомкнутого конца тракта передачи импульса развёртки получить на отклоняющих пластинах практически удвоенную амплитуду, а значит и крутизну импульса развёртки. Это снижает вдвое требования к выходной амплитуде генератора развёртывающих импульсов. Была выбрана такая геометрия пластин, которая вплоть до скорости развёртки, равной 7-ми скоростям света, не ограничивает длину трассы развёртки [10].

До установки времяанализирующих ЭОП в камеру были проведены испытания импульсной электрической прочности их межэлектродных промежутков: фотокатод-ускоряющий электрод, ускоряющий электрод-фокусирующий электрод и фокусирующий электрод-анод. Для испытаний использовался генератор прямоугольных импульсов отрицательной полярности с амплитудой, регулируемой от 1 до 30 кВ. Время нарастания и спада импульса составляло нс, длительность плоской вершины могла дискретно регулироваться от 5 до 30 нс. Для того, чтобы время нарастания и спада импульса не изменялось при регулировании амплитуды в таком широком диапазоне в качестве коммутатора был выбран трехэлектродный вакуумный разрядник, обеспечивавший постоянство времени нарастания и времени спада.

При испытаниях контролировались форма импульса на промежутках на предмет наличия или отсутствия пробоев и наличие или отсутствие свечения между электродами и в первую очередь между фотокатодом и ускоряющим электродом. Предварительно методика испытаний была опробована, а затем уточнена и детально отработана на технологических ЭОП. В качестве технологических использовались ЭОП, отбракованные при их испытаниях в статическом режиме по таким

параметрам, как чувствительность фотокатода, эксцентриситет фокусирующей или отклоняющей систем, пространственное разрешение и т.п.. При испытаниях некоторых технологических ЭОП максимальная напряженность электрического поля у фотокатода при длительности плоской вершины импульса 5 нс достигла 33 кВ/мм, что почти в три раза выше предполагаемой рабочей. Количество испытательных импульсов колебалось от нескольких сотен до 1000. Всего было испытано 9 технологических ЭОП. Поскольку амплитуда испытательных импульсов увеличивалась постепенно до величины, превышающей рабочую не менее чем в 1,5 раза, то в большинстве случаев в процессе испытаний происходила тренировка испытуемых промежутков. При этом, если при очередном повышении напряжения свечение появлялось, то, как правило, после нескольких импульсов оно исчезало. Основными критериями для отбраковки были визуально видимое повреждение фотокатода в результате пробоя промежутка фотокатод-ускоряющий электрод и существенное снижение чувствительности фотокатода в результате отравления фотокатода газовой выделением при интенсивных свечениях или пробоях промежутков между другими электродами. Забраковано было 6 технологических ЭОП из 9.

Кондиционные ЭОП (2шт с катодами S-20 и 2шт с катодами S-1) были испытаны при напряженности поля у фотокатода, превышающей предполагаемую рабочую в 1,2 раза. В результате один ЭОП из 4-х был забракован. Один из таких кондиционных ЭОП с катодом S-1, успешно выдержавший испытания, был установлен в камеру и затем испытан в ней.

3. Вопросы разработки управляющей электроники

Как было отмечено выше, главная трудность в разработке управляющей электроники заключалась в создании генератора развёртывающих импульсов (ГРИ), обеспечивающего формирование исходных парафазных симметричных импульсов-ступенек с плоской вершиной, с амплитудой не менее 5 кВ, с фронтом не более 0,2 нс, с малой нестабильностью задержки

относительно запускающего импульса, так называемым джиттером, не превышающим 10-20 пс.

Для обеспечения реального предельного временного разрешения в 200-300 фс, оговоренного в техническом задании на камеру, крайне желательно, чтобы её предельное техническое временное разрешение, определяемое как время, в течение которого развёртываемый электронный луч перемещается на экране времяанализирующего ЭОП на величину элемента пространственного разрешения, было бы в 2-3 раза меньше реального предельного временного разрешения. То есть предельное техническое временное разрешение должно составлять 100-150 фс. Тогда при техническом временном разрешении в 100 фс и минимальном размере разрешаемого элемента 0,1мм на экране времяанализирующего ЭОП величина коэффициента развертки должна быть 10 пс/см. Для этого был разработан такой генератор развёртывающих импульсов, имеющий следующие параметры:

- количество выходных каналов.....2
- полярность импульсов на выходе каналов:
 - первый канал.....положительная
 - второй канал..... отрицательная
- амплитуда импульса на выходе каждого канала, кВ.....5,5
- время нарастания импульса, пс.....150
- длительность плоской вершины импульса, нс.....30
- неравномерность плоской вершины импульса, %, не более.....10
- «мертвое время», нс.....45
- джиттер каждого канала, пс, не более.....10

Для формирования более медленных разверток амплитуда выходных импульсов ГРИ с помощью дополнительных пассивных элементов-интеграторов уменьшалась дискретными ступенями, а время нарастания увеличивалось. Таким способом коэффициент развертки можно было увеличивать вплоть до 1000 пс/см. Предполагалось при длине развёртки 4см

обеспечить следующие коэффициенты развёртки: 1-й диапазон – 10 пс/см, 2-й – 30 пс/см, 3-й – 100 пс/см, 4-й – 300 пс/см и 5-й – 1000 пс/см.

Формирование импульсов развертки в каждом канале ГРИ осуществлялось с помощью цепочки специальных полупроводниковых ключей – быстроионизируемых динисторов (Fast Ionized Dynistor - FID), включенных последовательно друг за другом. Включённый последовательно с этой цепочкой полупроводниковый обостритель, аналогичный описанному в [12], уменьшал время нарастания выходного импульса до 150 пс.

Генератор затворных импульсов (ГЗИ), также построенный на цепочке FID-приборов, формировал на выходе импульс отрицательной полярности с амплитудой 12 кВ, с длительностью фронта 1,5 нс и длительностью плоской вершины 30 нс. Импульс ГЗИ подавался одновременно на фотокатод и фокусирующий электрод ЭОП относительно ускоряющего электрода-сетки. В таком режиме ЭОП работал только на 1-м диапазоне развёртки, когда он должен обеспечивать заданное в ТЗ на камеру предельное временное разрешение 200-300 фс, и на 2-м диапазоне, когда временное разрешение камеры близко к предельному. То есть и ГЗИ работал только на 1-м и 2-м диапазонах развёртки. При этом исходные постоянные напряжения на фотокатоде и ускоряющем электроде были одинаковыми и составляли 12 кВ, напряжение на фокусирующем электроде было около 10 кВ, а полные напряжения на фотокатоде и фокусирующем электроде при подаче импульса ГЗИ составляли 24 кВ и 22 кВ соответственно. На остальных диапазонах, где техническое временное разрешение далеко от предельного, на электроды электронной линзы ЭОП подавались только постоянные напряжения при полном ускоряющем напряжении 15 кВ, а напряжённость поля у фотокатода составляла 3 кВ/мм.

4. Устройство и принцип работы камеры

Структурная схема камеры приведена на рис.4.1.

Элементы 1 – 6 образуют ее электронно–оптический тракт. Оптическая часть этого тракта максимально упрощена для того, чтобы свести к минимуму затягивание фемтосекундных импульсов в элементах оптики в результате хроматической дисперсии. Наибольшее затягивание, как правило, вносят сложные и толстые объективы. Поэтому для камеры был выбран входной объектив, рассчитанный в своё время в Государственном Оптическом Институте (ГОИ), имеющий весьма небольшую суммарную толщину стекла. При его использовании нужно помнить о затягивании и представлять себе величину этого затягивания, составляющую ~100 фс. Тем не менее, в тех случаях, когда можно обойтись без объектива, лучше его не применять.

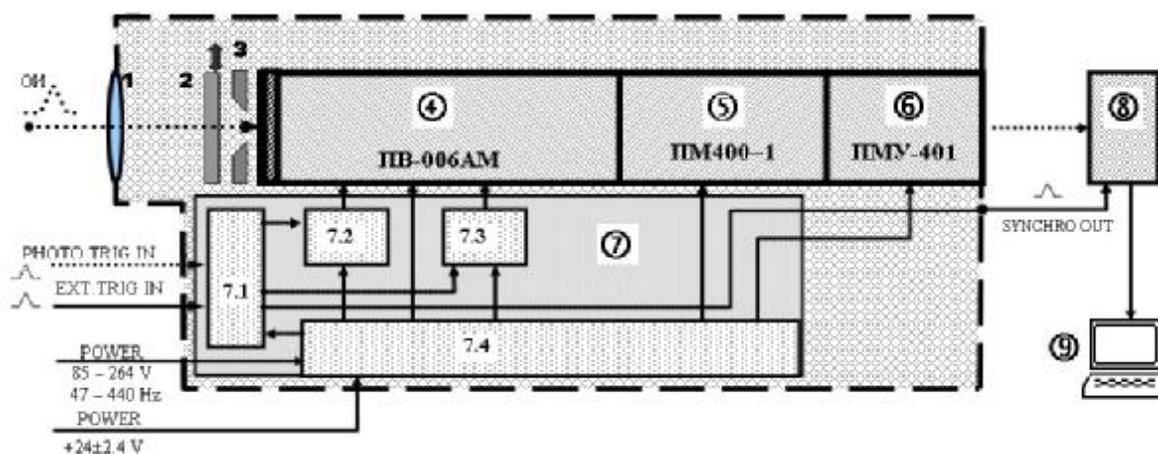


Рис. 4.1. Структурная схема камеры.

Здесь: ОИ – оптический импульс; 1 – входной объектив; 2 – механический затвор; 3 – щель (или щелевая мира); 4 – времяанализирующий ЭОП ПВ-006АМ; 5 – ЭОП ПМ-400-1 – первый усилитель яркости; 6 – ЭОП ПМУ- 401 – второй усилитель яркости; 7 – блок управления в составе: 7.1 - входной формирователь импульсов запуска; 7.2 - генератор затворных импульсов – ГЗИ (shutter unit); 7.3 - генератор развёртывающих импульсов – ГРИ (sweep unit); 7.4 - блоки питания ЭОП и управляющей электроники; 8 - телевизионная камера (ТВК) считывающего устройства; 9 - персональный компьютер.

Щели и щелевая мира устанавливаются в камере вплотную к стеклянному окну (толщина окна ~ 2 мм) фотокатода времяанализирующего ЭОП. Их изображение переносится на фотокатод регистрируемым излучением малой расходимости и небольшой (≤ 3 мм) апертуры, характерными для фемтосекундных лазерных систем. При расходимости входного излучения 10^{-2} рад пространственное разрешение на фотокатоде ЭОП составляет не менее 20 п.л./мм. Щелевая мира, а также щели шириной 0,2 и 0,1 мм выполнены методом фотолитографии на стекле толщиной 2,7 мм. Щель шириной 0,05 мм, при которой на первом диапазоне развёртки камера имеет предельное временное разрешение, выполнена методом фотолитографии на металлической фольге толщиной 0,05 мм. Таким образом, она в этом случае не затягивает оптический импульс.

Исследуемый оптический импульс или изображение регистрируемого процесса поступают на фотокатод времяанализирующего ЭОП (4) непосредственно (то есть без входного объектива камеры) или через входной объектив (1) соответственно. В режиме “SWEEP UNIT”, когда включен ГРИ, а к фотокатоду ЭОП прижата щель, камера позволяет регистрировать линейную развёртку изображения исследуемого процесса, вырезанного (ограниченного) этой щелью.

На фотокатоде ЭОП (4) оптическое изображение преобразуется в электронное и с помощью электростатической линзы строится на люминесцентном экране. Люминофор экрана нанесён на волоконно-оптический диск. Развёртка электронного изображения по экрану осуществляется в ЭОП (4) с помощью отклоняющих пластин при подаче на них линейноизменяющегося напряжения от ГРИ (7.3).

На 3–5-м диапазонах развёртки, когда камера ещё не имеет предельного временного разрешения, времяанализирующий ЭОП (4) работает при полном ускоряющем напряжении 15 кВ. На 1-м диапазоне, когда камера имеет предельное временное разрешение, и на 2-м диапазоне, когда временное разрешение приближается к предельному, к постоянному

ускоряющему напряжению ЭОП (4) 12 кВ с помощью ГЗИ (7.2) добавляется импульсное напряжение 12 кВ. При этом хроматическая абберация электростатической линзы ЭОП (4) значительно уменьшается, что позволяет достичь высокого временного разрешения.

К экрану ЭОП (4) прижат катодный волоконно-оптический диск первого усилителя яркости – модульного ЭОП ПМ-400-1 5 без микроканальной пластины (МКП). Таким путем с помощью волоконной оптики изображение с экрана ЭОП (4) переносится на фотокатод ЭОП (5). Усиление яркости в ЭОП (5) происходит за счёт энергии, получаемой электронами от ускоряющего поля электростатической линзы этого ЭОП. Усиленное в ЭОП (5) изображение с его экрана также с помощью волоконной оптики переносится на фотокатод ЭОП ПМУ-401 - второго усилителя яркости (6) с встроенной МКП и волоконным выходом. МКП обеспечивает усиление потока фотоэлектронов до 10^3 раз, а коэффициент преобразования до 10^4 . Благодаря второму усилителю яркость на выходе камеры увеличивается до уровня, необходимого для надежной записи изображения развертки ПЗС считывающим устройством, состоящим из ТВК (8) и персонального компьютера (9). Оптическая связь ТВК, в которой использовалась ПЗС матрица с волоконным входом, с выходом ЭОП (6) осуществлялась посредством фоконна, сжимавшего изображение в 4 раза.

Назначение остальных элементов (7.1 и 7.4) структурной схемы камеры тривиально и понятно из их названия. Питание камеры может осуществляться как от промышленной сети с напряжением 85-264 В, так и от аккумуляторной батареи с напряжением +(18-36) В. Последнее необходимо для обеспечения помехозащищённости камеры при работе её в условиях чрезвычайно высокого уровня электромагнитных помех.

Конструктивно камера К009 выполнена в корпусе широко известной камеры Агат-СФЗ, в котором практически полностью была удалена передняя часть с входной оптической системой, состоявшей из 3-х объективов.

Внешний вид камеры показан на рис.4.2.



Рис.4.2. Внешний вид камеры K009.

5. Измерение основных параметров камеры и её испытания

При измерении пространственного разрешения камеры вплотную к сферизованному изнутри (для исключения неизохронности электронной линзы ЭОП) окну фотокатода прикладывалась щелевая мира с 4-мя рангами с пространственной частотой штрихов 5, 10, 15 и 20 п.л./мм. Она подсвечивалась квазипараллельным лучом осветителя L-04 нашей разработки на основе полупроводникового лазерного диода с длиной волны 780 нм, длительность импульса которого можно было изменять от 20 пс до ~1,5 нс. Записанное камерой изображение оценивалось как визуально на экране дисплея, так и объективно путём измерения контраста штрихов миры, развёрнутых в полосы. На всех диапазонах развёртки визуальное разрешение составляло не менее 10 п.л./мм на фотокатоде времяанализирующего ЭОП.

Измерение коэффициента развёртки камеры производилось путём определения временной цены 1см развёртки. Схема измерений показана на рис. 5.1. Для этого использовался тот же осветитель. В квазипараллельный луч осветителя устанавливались плоскопараллельные стеклянные пластины различной толщины. Они перекрывали половину апертуры луча и задерживали её на величину от 4 до 400 пс.

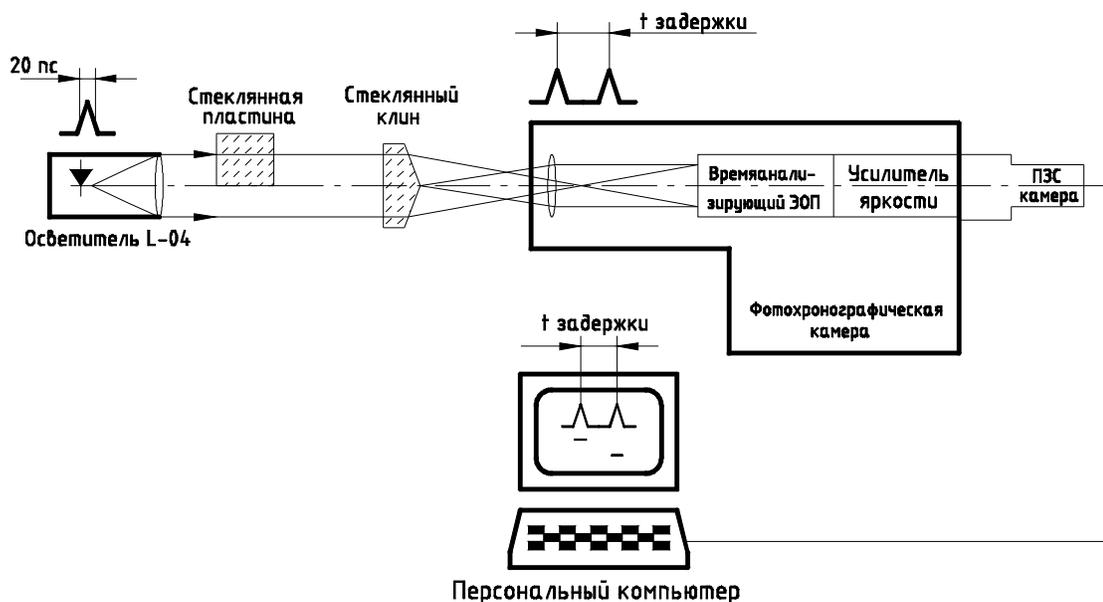


Рис.5.1. Схема измерения коэффициентов развёртки.

Таким образом происходило временное расщепление одиночного импульса осветителя на два, задержанных друг относительно друга на величину $\Delta t = d(n-1)/c$, где d - толщина пластины, n - коэффициент преломления стекла на длине волны 780 нм и c - скорость света в воздухе (вакууме). Толщина пластин измерялась микрометром, а их коэффициент преломления при необходимости мог быть точно измерен на имеющемся во ВНИИОФИ эталоне единицы коэффициента преломления.

Для того, чтобы исключить наложение изображений задержанных импульсов друг на друга на развёртке, использовался двойной симметричный оптический клин, являвшийся пространственным расщепителем луча. После клина входной объектив камеры строил на фотокатоде ЭОП два точечных изображения лазерного диода, сдвинутых друг относительно друга по вертикали на ~ 1 мм. Внешний вид элементов схемы, представленной на рис. 5.1, можно видеть на рис. 4.2.

Типичные записи задержанных один относительно другого импульсов осветителя L-04 приведены на рис. 5.2.

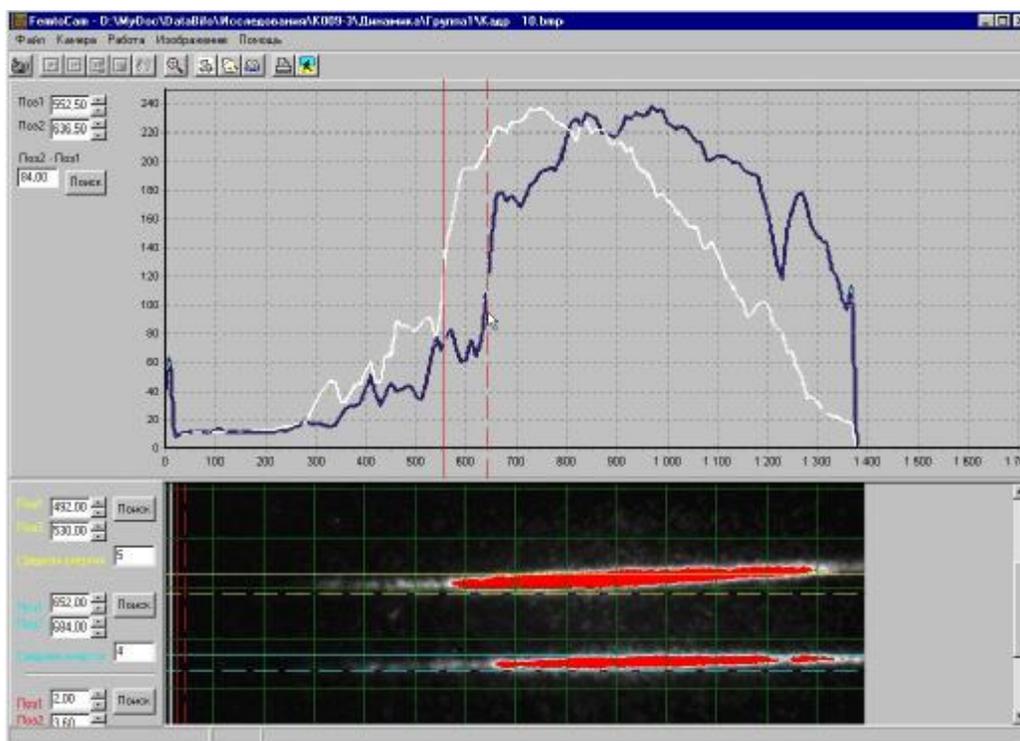


Рис.5.2. Изображение развёртки импульсов осветителя L-04 и их временные профили при коэффициенте развёртки 40 пс/см.

ПЗС считывающее устройство при анализе записанных изображений позволяло определять пространственную задержку ΔX между импульсами в направлении развёртки. При известной временной задержке Δt между этими импульсами коэффициент развёртки K_p вычисляется по формуле: $K_p = \Delta t / \Delta X$.

Путем подбора синхронизации между осветителем L-04 и камерой изображения двух синхронных импульсов выводились в начало развертки данного диапазона. Затем в нижнюю половину пучка устанавливалась плоскопараллельная пластина, задерживавшая эту часть пучка на время Δt_1 , равное 1/10 части длительности развертки на данном диапазоне. Полученная картина записывалась ПЗС считывающим устройством и обрабатывалась. При этом измерялась пространственная задержка ΔX_1 , и вычислялся коэффициент развертки $K_1 = \Delta t_1 / \Delta X_1$ на первом ее участке. Далее путем увеличения задержки запуска осветителя L-04 изображение пары задержанных друг относительно друга импульсов передвигалось вдоль

развертки на 1/10 её часть, вновь записывалось и обрабатывалось. В результате вычислялся коэффициент развертки $K_2 = \Delta t_1 / \Delta X_2$ на втором участке. И так далее. После получения значения K_{10} рассчитывалось среднее значение коэффициента развертки K_{cp} . Неоднородность коэффициента развертки δ_k вычислялась по формуле:

$$\delta_k = [(K_{cp} - K_i)_{max} / K_{cp}] \times 100\%.$$

Измерение временного разрешения на каждом диапазоне производилось со щелью 0,05 мм, установленной вплотную к фотокатоду времяанализирующего ЭОП и освещаемой импульсами Ti:Al₂O₃ лазера, генерировавшего непрерывную последовательность фемтосекундных импульсов на длине волны 786 нм. Период следования импульсов составлял 12,5 нс. Длительность одиночного импульса, измеренная автокоррелятором, составляла 60 фс.

При измерении предельного временного разрешения для контроля коэффициента развёртки в половину апертуры луча лазера вводилась стеклянная пластина, задерживавшая эту часть пучка на 2,6 пс. Судя по фотохронограммам, зарегистрированным камерой K009, излучение Ti:Al₂O₃ лазера представляло собой фемтосекундную структуру длительностью от ~2-х до 3-х пикосекунд, состоящую из гребёнки фемтосекундных импульсов, хаотически флуктуирующую в пространстве по сечению луча и во времени. Причем, нередко фемтосекундные временные структуры в задержанном и незадержанном импульсах практически не походили одна на другую. Тем не менее, были ситуации, когда при обработке двух изображений расщеплённого лазерного импульса удавалось найти в них такие пространственные сечения, в которых тонкая временная структура была, можно сказать, идеально одинаковой. То есть расстояния между одноимёнными фемтосекундными максимумами и одноимёнными фемтосекундными минимумами расщеплённых частей на фоне их медленных огибающих были одинаковыми. При этом характер изменения амплитуд импульсов тонкой (фемтосекундной) временной структуры, как и формы медленных огибающих двух частей

расщеплённого импульса, могли быть совершенно не похожими одна на другую. Примером может служить рис. 5.3, на котором показана фотохронограмма двух частей расщеплённого импульса. Вверху рисунка 5.3а показан временной профиль незадержанной части лазерного импульса, полученный при фотометрировании изображения развёртки окном шириной в 9 телевизионных строк ($w = 9$). $Y = 132$ – это координата верхней строки окна. Вверху рисунка 5.3б показан временной профиль задержанной части лазерного импульса, полученный при фотометрировании изображения развёртки окном такой же ширины в 9 телевизионных строк. $Y = 180$ – это координата верхней строки окна фотометрирования. При этом максимальная вариация задержки между 12-ю характерными точками временных профилей верхнего и нижнего лучей (максимумами или минимумами) составляет 1,7%, а между 17-ю точками - 5%. С увеличением числа сравниваемых (обрабатываемых) характерных точек вариация возрастает из-за нелинейности развёртки.

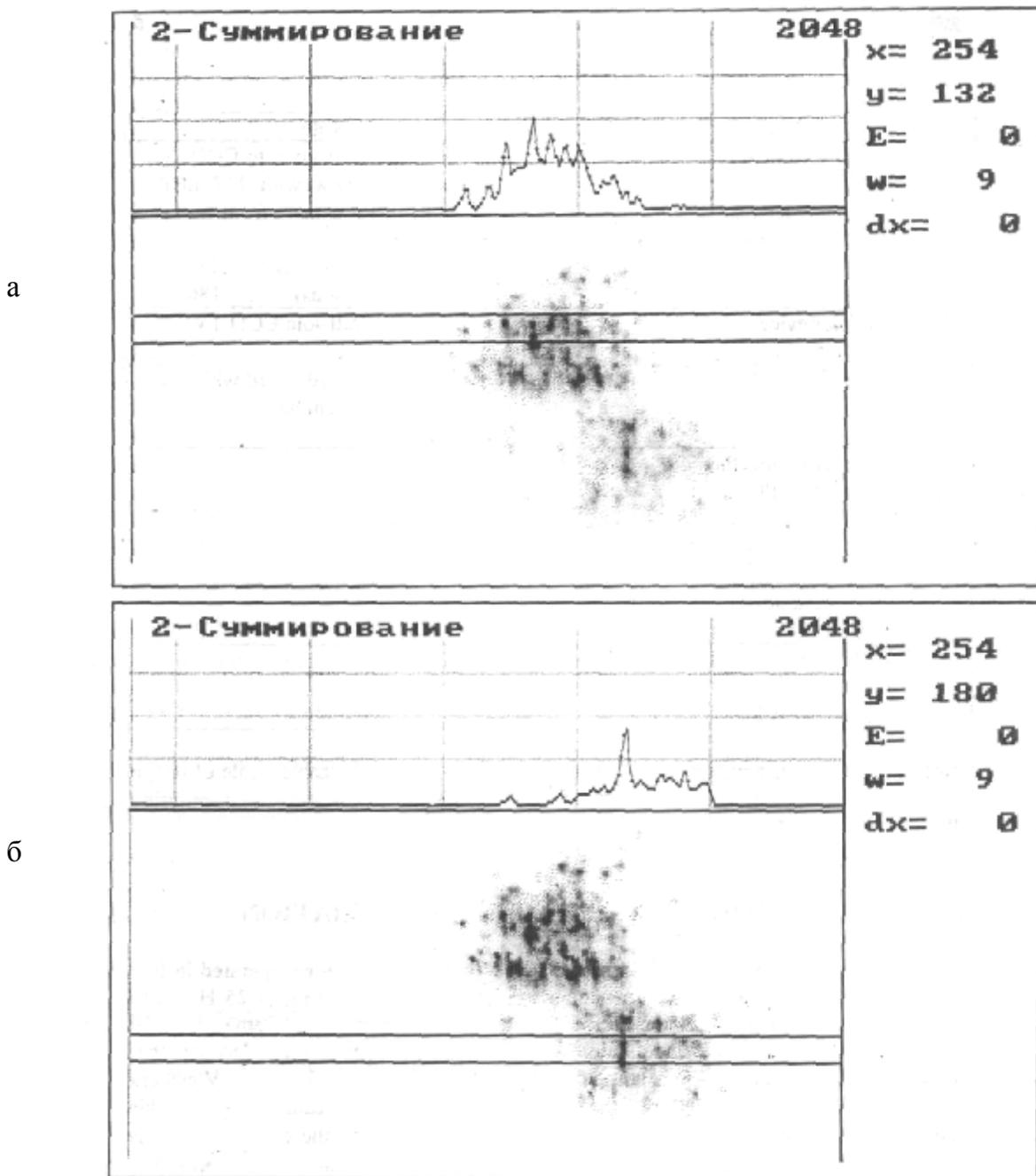
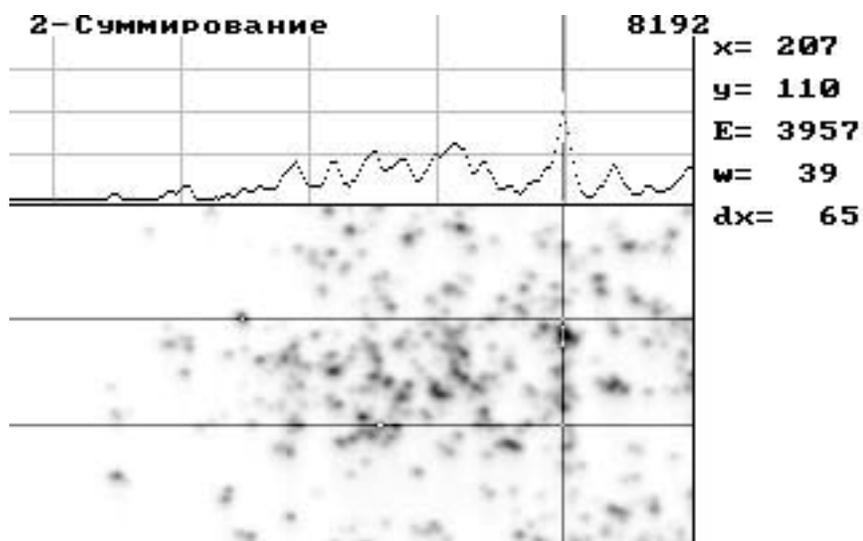


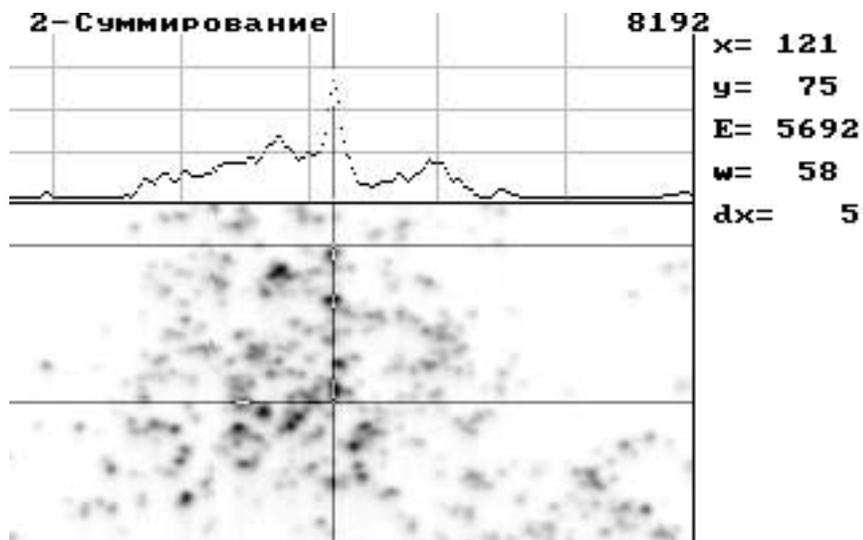
Рис. 5.3. Одинаковая фемтосекундная структура в обеих половинах расщеплённого импульса: март 2003 г., камера К009 (фотокатод S-1), кадр К009-28 ($U_{\text{кат}} = 24$ кВ, $E_{\text{кат}} = 12$ кВ/мм), коэффициент развертки $K_p = 9,7$ пс/см = 76 фс/пиксель. Нижняя половина лазерного луча задержана стеклянной пластиной на 2,6 пс относительно верхней половины. Полуширина пиков максимальной амплитуды в обеих половинах луча составляет 380 фс.

На рис. 5.4 показаны временные профили нескольких лазерных импульсов. При этом для повышения пространственного и соответственно временного разрешения камеры К009 из её электронно-оптического тракта был исключён фокон, связывавший выход 2-го усилителя яркости с входом ПЗС телекамеры и сжимавший изображение в 4 раза.

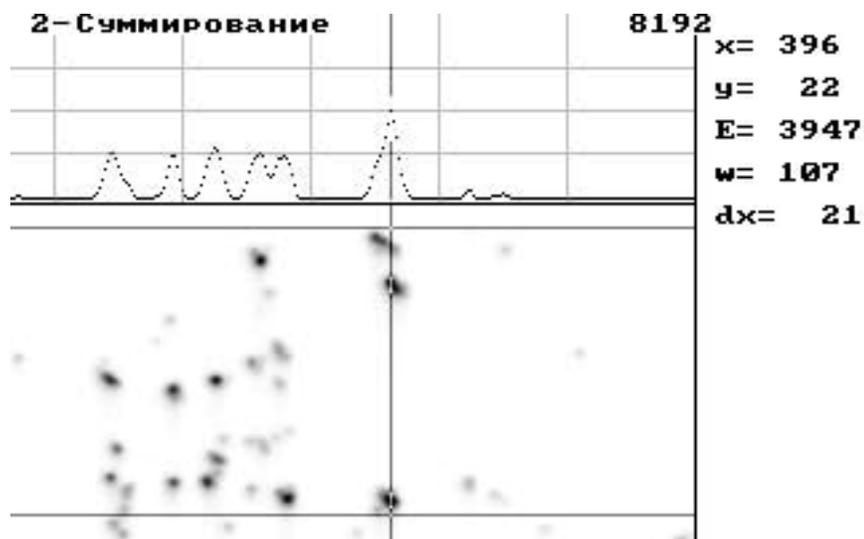
А



Б



В



Г

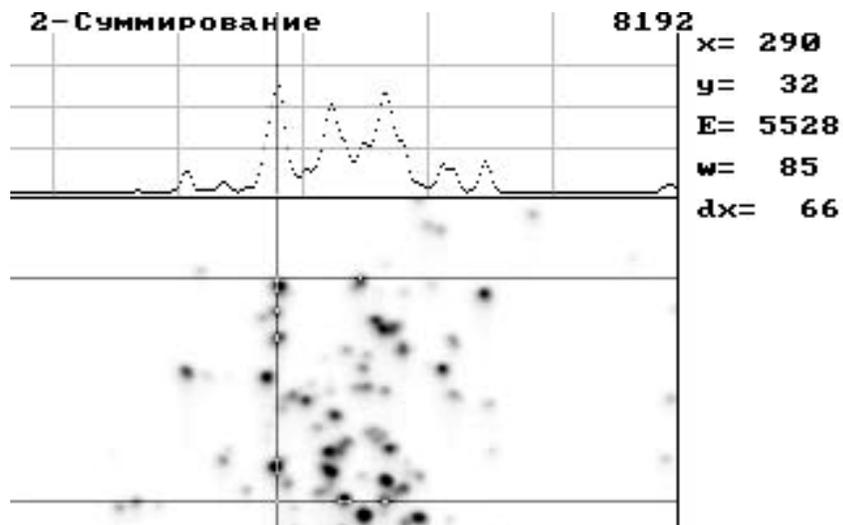


Рис. 5.4. Временные профили «нитей» генерации нескольких лазерных импульсов, зарегистрированных камерой K009.

Здесь w – ширина окна (число строк) при фотометрировании изображений развёртки импульсов, y – координата верхней строки окна интегрирования, E – интенсивность в относительных единицах псевдоразрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Длительности /фс/ и контраст / % / импульсов, обозначенных вертикальной чертой с координатой X , составили:

А) 160 фс и ~ 60% (коэффициент развёртки $K_p = 26$ фс/пиксель),

Б) 260 фс и ~ 60% ($K_p = 26$ фс/пиксель),

В) 150 фс и 100% ($K_p = 19$ фс/пиксель),

Г) 208 фс и ~75% ($K_p = 26$ фс/пиксель).

Длительность наиболее коротких импульсов, зарегистрированных камерой, составила 150 фс, что подтверждает соответствие её предельного временного разрешения требованиям технического задания на камеру: 200-300 фс.

В связи с тем, что предоставленный нам фемтосекундный лазер, как было отмечено выше, не генерировал одиночный импульс с высокой повторяемостью формы, длительности и амплитуды, необходимый для измерения динамического диапазона камеры, то измерить последний при испытаниях не представилось возможным.

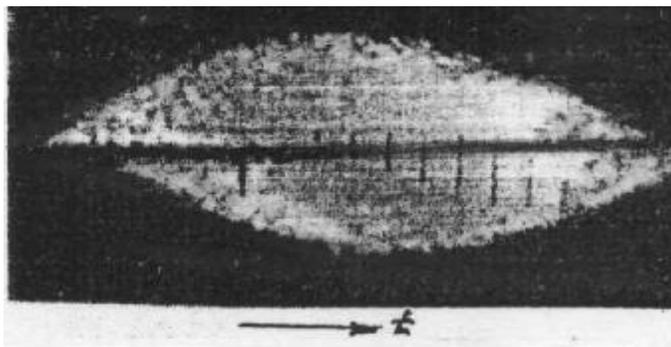
6. Обсуждение результатов испытаний

Приведенные здесь результаты, по нашему мнению, однозначно подтверждают то, что камера K009 имеет реальное предельное временное разрешение не хуже 200 фс. Об этом свидетельствуют фотохронограммы, показанные на рис. 5.4, где импульсы длительностью 160 фс и 150 фс разрешены с контрастом 60% и 100% соответственно. Тот факт, что при расщеплении лазерного импульса на два, задержанных друг относительно друга, камера регистрирует в них одинаковую временную фемтосекундную структуру, свидетельствует о том, что это не шум камеры, а действительно таковая временная структура лазерного излучения.

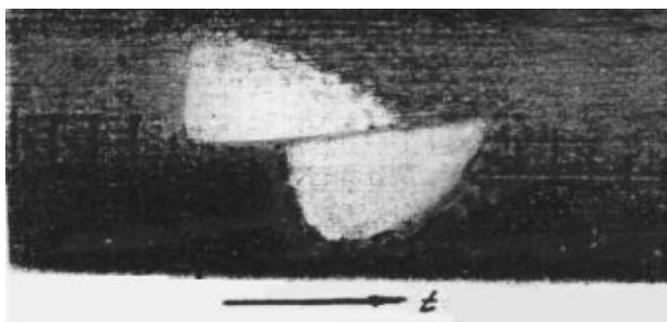
Обсуждение причин того, что при испытаниях на фемтосекундном лазере камера всегда регистрировала фемтосекундную структуру длительностью от ~2-х до 3-х пикосекунд, состоящую из гребёнки фемтосекундных импульсов, хаотически флуктуирующую в пространстве по сечению луча и во времени, в то время, как автокоррелятор наоборот показывал стабильную длительность

импульсов 60 фс, а спектральный контроль подтверждал то, что этот импульс одиночный, выходит за рамки этой статьи и требует отдельного обстоятельного обсуждения. Заметим только, что ситуации, подобные описанной, бывали неоднократно. Приведём лишь два примера.

Так, в 1986 году при испытании камеры Селена-2 в Институте Спектроскопии АН СССР (г. Троицк) на фемтосекундном лазере с длиной волны 590 нм автокоррелятор каждый раз показывал, что импульс одиночный и его длительность равна 200 фс. Камера же регистрировала действительно одиночные импульсы, но длительностью от ~ 2 до 6 пс, причём их форма менялась: появлялись то равнобокие импульсы почти гауссовой формы, то импульсы с крутым фронтом и более пологим спадом (рис. 6.1) [13].



а



б

Рис. 6.1. Импульсы фемтосекундного лазера, зарегистрированные в 1986 году камерой Селена-2: а – импульс почти гауссовой формы, б – импульс с крутым фронтом и пологим спадом; коэффициент развёртки 5 пс/см, нижняя часть импульса задержана относительно верхней на 2 пс.

Тогда объяснения такому расхождению найдено не было. Предположение о том, лазер генерирует гребёнку длительностью 2 – 6 пс, состоящую из фемтосекундных импульсов, каждый из которых камера не разрешает, отвергали и разработчики лазера, и разработчики камеры. Первые утверждали, что автокорреляционная методика обязательно показала бы, что импульс не одиночный, и предполагали, что камера не имеет фемтосекундного разрешения, а отклик её на одиночный фемтосекундный импульс как раз и имеет длительность от 2-х до 6-ти пикосекунд. Вторые утверждали, что, во-первых, отклик камеры на бесконечно короткий импульс, представляющий её аппаратную функцию, не должен меняться от импульса к импульсу ни по форме, ни по длительности, а во-вторых, с помощью точно такой же камеры Агат-04М ранее уже были зарегистрированы импульсы суперфлуоресцентного лазера на той же длине волны 590 нм с длительностью 600 фс при практически 100%-м контрасте [3] (см. рис. 1.3). Так что импульсы длительностью 200 фс камера Селена-2, пусть не со 100-процентным контрастом, но зарегистрировать была обязана.

В 1997 году при испытании рентгеновской камеры К006 [8] в США в Калифорнийском университете г. Беркли на фемтосекундном лазере фирмы Spectra Physics с длиной волны 400 нм камера от пуска к пуску также регистрировала разные и пространственные, и временные картины развёртки. При этом одиночные импульсы появлялись очень редко. В основном это были не очень регулярные гребёнки, длительностью от ~ 2 пс до 10 пс, содержавшие соответственно от 2-х до 5-7-ми импульсов разной формы и длительности. Причём, часто форма изображения щели на развёртке бывала выпуклой в направлении развёртки, что свидетельствовало о том, что волна излучения была не плоской, а вогнутой. Нередко наблюдалось и косое изображение щели, что означало плоский фронт волны, но не перпендикулярный направлению её распространения. Автокоррелятор никаких изменений от пуска к пуску не замечал и всё время показывал

стабильную длительность импульсов лазера 80 фс, а спектральный контроль свидетельствовал о том, что этот импульс одиночный...

Согласно критерию, принятому на 13-м Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии и фотонике в Токио в 1978 году [14], динамический диапазон пикосекундных камер определяют как отношение максимальной амплитуды входного тестирующего импульса к минимальной, при их длительностях, зарегистрированных камерой, отличающихся от длительности средней амплитуды, не более чем на 20%. Такую последовательность из 5-10 тестирующих импульсов с неизменной длительностью и спадающей по известному закону амплитудой получают обычно путем размножения одиночного импульса в интерферометре Фабри-Перо (нечто похожее показано на рис. 1.3). В [9] при измерении динамического диапазона использовали линейный ослабитель, видимо, набор калиброванных фильтров, с помощью которого последовательно на разных пусках развёртки изменяли амплитуду входного импульса и измеряли камерой его полуширину, каждый раз, цитируем, «следя за тем, чтобы эта полуширина не увеличивалась более чем на 20% по сравнению с полушириной, измеренной при минимальной входной плотности мощности излучения». При этом динамический диапазон на самой быстрой развёртке составил не более 10. Нужно заметить, что без использования интерферометра Фабри-Перо требования к повторяемости формы, амплитуды и длительности тестирующего лазерного импульса в свете указанного выше критерия оказываются исключительно высокими. Остаётся только позавидовать авторам [9], если действительно в их распоряжении был такой неправдоподобно ультрастабильный лазер, а измеренный электронно-оптической установкой статистический разброс длительности его импульсов, который обязательно присутствует при ограниченном количестве электронов в изображении, действительно не превышал 20%.

Представитель японской фирмы Хамамацу в Европе г-н Макс Скоглунд, посетивший ВНИИОФИ 14.05.2003 г., ознакомившись с только что

обработанными результатами испытаний камеры K009, сообщил, что их фемтосекундная камера FESCA-200 при коэффициенте развёртки 20 пс/см имеет динамический диапазон, равный 14. Это, на наш взгляд, отличное достижение. Однако, если судить по единственному до сих пор опубликованному и то только в рекламном проспекте на камеру FESCA-200 изображению развёртки фемтосекундного лазерного импульса, расщеплённого по времени на два одинаковой амплитуды, длительности которых, измеренные этой камерой на самой быстрой развёртке, отличаются друг от друга в $180 \text{ фс}/108 \text{ фс} = 1,7$ раза, а амплитуды в 1,6 раза (рис. 6.1), то в свете указанного выше критерия это однозначно свидетельствует о том, что динамический диапазон FESCA-200 далеко не соответствует названной цифре 14. Похоже, он существенно меньше.

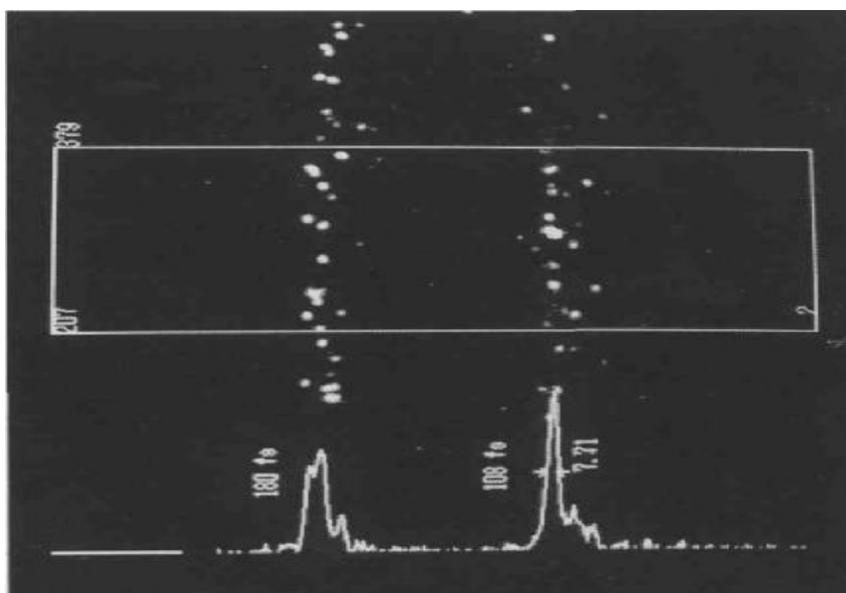


Рис. 6.1. Камера FESCA-200 (рекламный проспект 1995года): развёртка фемтосекундного лазерного импульса, расщеплённого по времени на два.

Предупреждение о том, что динамический диапазон электронно-оптических камер по мере приближения их временного разрешения к физическому пределу этого метода будет сокращаться до считанных единиц, было опубликовано ещё в [10 и 13]. Судя по картинкам, полученным нашей камерой при коэффициенте развёртки $\sim 10\text{-}13$ пс/см (рис. 5.3 и 5.4), где

хорошо видно, что количество электронов в изображении весьма невелико, априори можно утверждать, что её динамический диапазон при этом вряд ли превышал 10.

Заключение

Вопрос о согласии двух методов измерения параметров ультракоротких оптических импульсов – широко применяемого во всём мире автокорреляционного (косвенного) метода и электронно-оптического (прямого) метода остаётся, на наш взгляд, открытым и требует дальнейшего детального и углублённого изучения с набором значительного статистического материала.

Разработка и выпуск доступных электронно-оптических камер с фемтосекундным временным разрешением является необходимым для этого условием.

Литература

1. О.М. Брехов, В.Б. Лебедев и др., Экспериментальная электронно-оптическая камера “Агат-04М” со скоростью развёртки $5,2 \times 10^{10}$ см/с, Труды 14-го Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике, М., 1980, стр.253.
2. Брехов О.М., Лебедев В.Б., Прохоренко В.И. и др., Электронно-оптическая регистрация флуктуационной субпикосекундной структуры в излучении неодимового лазера, Квантовая электроника, том 9, № 7, 1982, стр. 1471-1473.
3. Брехов О.М., Лебедев В.Б., Лузанов В. Б. и др., Регистрация импульсов субпикосекундной длительности в излучении лазеров на неодиме и красителе, Тезисы докладов 10 Всесоюзной научно/технической конференции «Высокоскоростная фотография и метрология быстротекущих процессов», Москва, 1-4 декабря, 1981, стр. 15.
4. Г.В. Колесов, В.Б. Лебедев, Высокоскоростная электронно-оптическая техника ВНИИОФИ. Итоги разработок за 10 лет (1979-1989 гг.), Методы и

средства измерений параметров быстропротекающих процессов, Сборник научных трудов, М.: Изд. ВНИИФТРИ, 1989, стр. 5-36.

5. Брехов О.М., Ильинов А.Ф. Лебедев В.Б. и др., Полупроводниковый коммутатор, управляемый пикосекундным лазерным излучением, 11 Всесоюзная научно-техническая конференция «Высокоскоростная фотография и метрология быстропротекающих процессов», Тезисы докладов, - М.: ВНИИОФИ, 1983, стр. 6.

6. Фанченко С. Д., Тенденции развития электронно-оптической фотографии, там же, где и [1], стр.27.

7. Лебедев В.Б., Сырцев В.Н., Фельдман Г.Г., Электропрочность ускоряющего промежутка импульсного электронно-оптического преобразователя, ПТЭ, № 4, 1990 г., стр. 184-185.

8. V. V. Lebedev, G. G. Feldman et al., Development and testing of subpicosecond streak camera for soft X-ray measurements, SPIE, 1999, Vol. 3516, p.p. 74-84.

9. А.М. Прохоров, Н.С. Воробьёв и др., Регистрация излучения Ti: сапфирового лазера с высоким временным и пространственным разрешением, Квантовая электроника, 32, № 4, 2002, стр. 283-284.

10. В.Б. Лебедев, Некоторые вопросы разработки электронно-оптических камер с пико-фемтосекундным временным разрешением, Методы и средства измерений параметров быстропротекающих процессов, Сборник научных трудов, М.: Изд. ВНИИФТРИ, 1989, стр. 36-61.

11. A. Maksimchuk, M. Kim, J. Workman, G. Korn, J.Squier, D. Du, D. Umstadter, G. Mourou, M. Bouvier, Signal averaging x-ray streak camera with picosecond jitter, Review Scientific Instruments, Vol. 67, No. 3, March 1996, pp. 697-699.

12. Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф., и др., Применение кремниевых p-n переходов в схемах управления пикосекундными ЭОП, там же, где и [1], стр.222.

13. Averin V.I., Guskova M.S., Korzhenevich I.M., Kolesov G.V., Lebedev V.B., Maranichenko N.I., Sobolev A.A., Image converter streak cameras with superlight-

speed scanning, SPIE, 1991, Vol. 1358, Proc. of the 19th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 16-21 Sept. 1990, Cambridge, England, p.p. 589-602.

14. S.W. Tomas, Dynamic Range Measurement Definition, Proceedings of the 13th International Congress on High-Speed Photography and Photonics (Special Session on Streak Camera), 20-25 August 1978, Tokyo, Japan, pp. 838-839.