

УДК 621.2.082

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ПИКОСЕКУНДНЫХ СТРИК-КАМЕР

© 2011 г. Н. Н. Агеева, И. Л. Бронева, Д. Н. Забегаев, А. Н. Кривоносов, Н. С. Воробьев*,
П. Б. Горнастаев*, В. И. Лозовой*, М. Я. Щелев*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11/7
E-mail: bil@cplire.ru*

**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

Поступила в редакцию 14.09.2010 г.
После доработки 15.01.2011 г.

Исследованы погрешности измерений двумя электронно-оптическими системами временного хода интенсивности света в пикосекундном лазерном импульсе. Первая система — это пикосекундная стрик-камера российского производства, вторая система, созданная в Германии, состоит из пикосекундной стрик-камеры, соединенной с двойным спектрографом. Подобные системы тестируются изготовителями с помощью фемтосекундных импульсов, что, однако, не позволяет предсказать погрешности измерений пикосекундных импульсов. Предложены и измерены параметры, характеризующие именно такие погрешности. Установлен характер их изменения при увеличении амплитуды (энергии) измеряемых импульсов, изучено влияние формы сечения светового луча на точность измерений.

1. ВВЕДЕНИЕ

При оптических исследованиях сверхбыстрых процессов обычно применяют два способа измерений длительности сверхкоротких световых импульсов. Более широко используются нелинейно-оптические методы (со смещением в нелинейном оптическом кристалле двух импульсов, сдвигаемых по времени). Фактически, они являются методами измерения корреляционных функций и соответственно косвенными средствами исследования формы импульсов [1]. Для прямого измерения огибающей сверхкороткого светового импульса используют стрик-камеру — фотоэлектронный регистратор быстропротекающих процессов, основным элементом которого является электронно-оптический преобразователь (э.о.п.) с линейной разверткой фотоэлектронных изображений, ограниченных на входе камеры узкой щелью [1, 2].

Важный вопрос применения стрик-камер заключается в возможности практической реализации той точности регистрации светового импульса, которая заложена в паспорте стрик-камеры. Это существенно для проведения прецизионных измерений, в частности, при исследовании сверхбыстрых процессов в физике полупроводников, лазерной спектроскопии и т.д.

Для измерения характеристик стрик-камер производители проводят их тестирование импульсами фемтосекундного лазера. При тестировании измеряется временная аппаратная функция (в.а.ф.),

определяющая временное разрешение камеры (рис. 1), которое в лучшем случае составляет десятые доли пикосекунды.

Однако при использовании стрик-камер для прецизионных измерений пикосекундных сигналов вопрос точности измерений остается в значи-

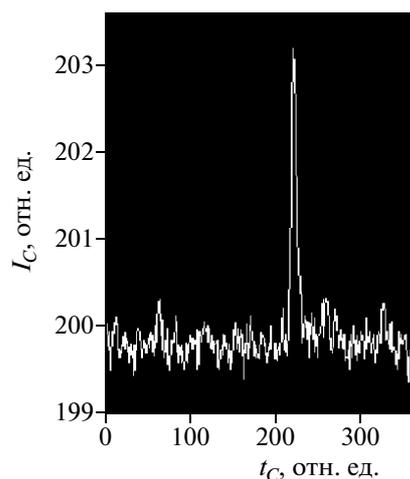


Рис. 1. Регистрация светового импульса длительностью 10 фс стрик-камерой PS-1 при скорости развертки 10 пс/мм, определяющая временное разрешение — 1.0 пс. На оси абсцисс 100 отн. ед. соответствуют 13.5 пс. Метод заведения луча в стрик-камеру — щелевой (см. раздел 2).

тельной степени открытым, поскольку результаты регистрации камерой фемтосекундных импульсов нельзя автоматически переносить в пикосекундный диапазон, в частности, из-за нелинейных эффектов при увеличении средней лучевой нагрузки. Исследование точности измерений пикосекундных лазерных импульсов стрик-камерой описано в данной работе и кратко представлено в [3].

Исследованы погрешности в измерениях пикосекундных импульсов света двумя системами: стрик-камерой и стрик-камерой, оптически связанной с двойным спектрографом. Из результатов измерений оценивались следующие параметры: погрешность в определении интенсивности света в фиксированный момент времени; погрешность определения момента времени, в который интенсивность света имеет фиксированное значение; динамический диапазон камеры; в.а.ф., ширина которой характеризует превышение длительности импульса, измеренной стрик-камерой, над длительностью лазерного импульса. Этот набор параметров дает возможность оценить погрешности измерений тех локальных изменений временной формы импульсов или изменений их длительности, которые могут возникать при взаимодействии светового пикосекундного импульса с исследуемым веществом.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Первая из исследованных систем – стрик-камера PS-1 с п.з.с.-камерой Hamamatsu C8484-05-G (п.з.с. – прибор с зарядовой связью). Эта стрик-камера разработана и изготовлена в Институте общей физики (ИОФ) им. А.М. Прохорова РАН. Вторая – это поставляемая компанией S&I Spectroscopy and Imaging (Германия) оптическая система, состоящая из двойного спектрографа (два спектрографа SpectraPro-2500i), настроенного на режим вычитания дисперсии, и оптически связанной со спектрографом стрик-камеры Optoscope streak camera Optronis, на выходе которой установлена п.з.с.-камера CoolSNAP.

Стандартное тестирование стрик-камеры PS-1 проводилось в ИОФ РАН с использованием фемтосекундного лазера Femtosource Sinergy, генерирующего импульсы длительностью ~10 фс с частотой повторения 75 МГц и длиной волны света 790 нм.

Технические характеристики стрик-камеры PS-1: Э.о.п. PIF-01; тип фотокатода – S1; спектральный диапазон 250–1300 нм; спектральная чувствительность на длине волны 1064 нм – 520 мкА/Вт; диаметр активной площади фотокатода 6 мм; электронно-оптическое увеличение 1.5; скорость разверток 10–20000 пс/мм; предельное временное разрешение 1 ± 0.5 пс; нелинейность разверток $\leq 10\%$; динамический диапазон на развертке 10 пс/мм – ≤ 10 ; нестабильность сраба-

тывания (джиттер) для развертки 10 пс/мм – 50 пс; задержка срабатывания для развертки 10 пс/мм – 25 нс.

Следующие параметры стрик-камеры Optronis взяты из технического описания системы S&I: тип фотокатода – S1; активная площадь фотокатода 2×8 мм²; электронно-оптическое увеличение – 2; блок развертки FTSU-1; предельное временное разрешение – 2 пс; скорость разверток 10–1000 пс/мм; джиттер для развертки 10 пс/мм – 5 пс; задержка срабатывания для развертки 10 пс/мм – 16 нс.

В наших опытах источником пикосекундных импульсов света с длиной волны 1.064 мкм служил YAG-лазер с диодной накачкой PL PDP1-300 (компания “СинхроТех”, Россия). Лазер генерировал одиночные импульсы с энергией 0.4 мДж и шириной спектра 1 нм. Длительность импульса, измеренная изготовителем лазера с помощью автокоррелятора CPS-2-75, $t_n = 22$ пс (п.ш.п.в. – полная ширина кривой распределения на уровне половины амплитуды (полувысоте)). Нестабильность энергии и длительности лазерного импульса не превышала 2%.

Часть лазерного излучения отводилась для оптического запуска стрик-камеры с помощью кремниевое $p-i-n$ -фотодиода. Сигнал фотодиода в зависимости от энергии импульса лазера имел амплитуду 1–5 В и длительность 2 нс (п.ш.п.в.). Этот сигнал, пройдя изменяемую ступенчато кабельную линию задержки, подавался на стрик-камеру для ее запуска. Основная часть излучения после прохождения воздушной линии задержки фиксированной длины и набора калиброванных нейтральных светофильтров освещала входную щель стрик-камеры PS-1 или двойного спектрографа S&I.

Измерения проводились при максимальной скорости развертки стрик-камер, и для стрик-камеры PS-1 была проведена проверка этой скорости, для чего половина сечения луча лазерного импульса пропусклась через стеклянную пластинку известной толщины и поступала на вход стрик-камеры с заранее известной задержкой относительно другой половины луча. Проверка подтвердила, что скорость развертки равна 10 пс/мм и соответствует техническому описанию. Для стрик-камеры Optronis такая калибровка не проводилась, поскольку для этого пришлось бы отсоединять блок оптической связи стрик-камеры со спектрографом, на что пользователь не имел права.

При измерениях стрик-камерой PS-1 применялись два способа ее освещения: точечный и щелевой. При точечном методе лазерный луч фокусировался в пятно диаметром около 45 мкм (п.ш.п.в.) и попадал внутрь входной щели камеры. Для изменения энергии лазерного импульса использовались калиброванные нейтральные светофильтры. При щелевом методе световой луч диаметром около 3 мм освещал входную щель, ширину которой ва-

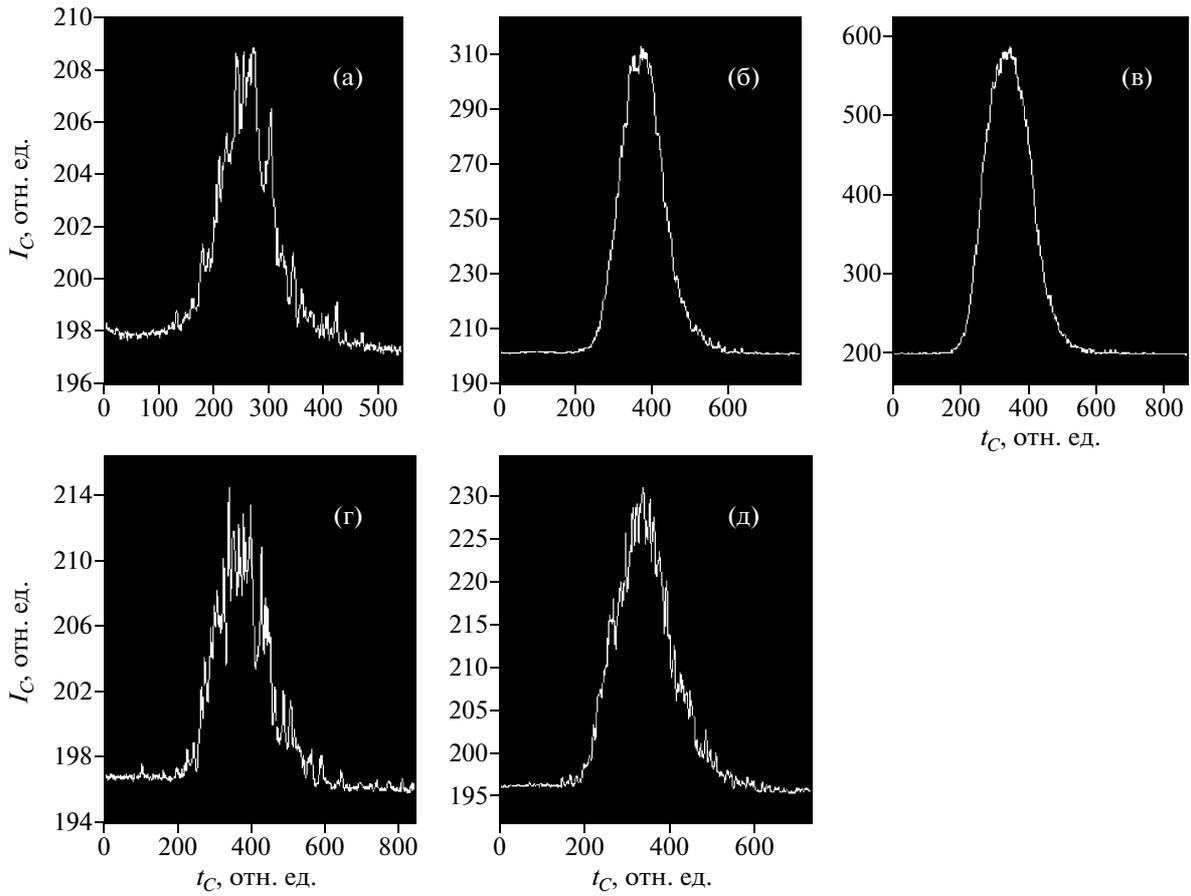


Рис. 2. Хронограммы световых импульсов с различной энергией, измеренных стрик-камерой PS-1 при щелевом методе заведения луча (а–в) и точечном (г, д): а – $A = 10$ отн. ед., $t_{0.5} = 19$ пс; б – 108 отн. ед., 20 пс; в – 370 отн. ед., 29 пс; г – 15 отн. ед., 23.5 пс; д – 33 отн. ед., 21 пс. На оси абсцисс 100 отн. ед. соответствуют 17 пс.

рыировали в пределах $W_s = 45\text{--}190$ мкм. На фотокатод падала вырезанная щелью часть луча с сечением в форме полоски. Энергию светового импульса пикосекундного лазера изменяли нейтральными светофильтрами (до его попадания на щель стрик-камеры), и в опытах использовались три относительные значения энергии E , отн. ед.: 1, 1.4 и 7.

В соответствии с требованиями эксплуатации системы S&I световой луч фокусировали на вход спектрографа в круглое пятно возможно минимального диаметра, и фокусное отношение составляло примерно $f/12$, что не выходило за границу приведенного в техническом описании спектрографа SpectraPro-2500i значения $f/6.5$. Диаметр луча, измеренный п.з.с.-камерой CoolSNAP при выключенной развертке, составлял около 40 мкм (п.ш.п.в.). Измерения, описываемые ниже, проводились при фиксированной ширине 100 мкм выходной щели спектрографа и последовательном уменьшении ширины промежуточной щели до 60 мкм, что одновременно уменьшало энергию импульса, измеряемого стрик-камерой Ortronis, и улучшало условия для вычитания временной дисперсии. Из

набора дифракционных решеток спектрографа использовались имевшие наименьшее разрешение – 300 штрихов/мм.

3. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Зависимость интенсивности света от времени в пикосекундном импульсе, измеренная стрик-камерой, далее называется хронограммой $I_C = f(t_C)$.

Примеры полученных хронограмм, измеренных PS-1 и S&I, представлены соответственно на рис. 2 и 3, а их параметры поясняет рис. 4. Практически на всех хронограммах присутствуют шумовые импульсы, существенно искажающие хронограмму, особенно при регистрации импульсов с малыми энергиями. Причинами этого нестационарного шума являются известные факторы: неравномерность фотоэмиссии электронов и их рекомбинации в фотокатод, разброс коэффициента умножения в микроканальном усилителе и т.д. Шум на хронограмме, измеренной системой S&I и показанной на рис. 4а, выделен на рис. 4б, а его спектр представ-

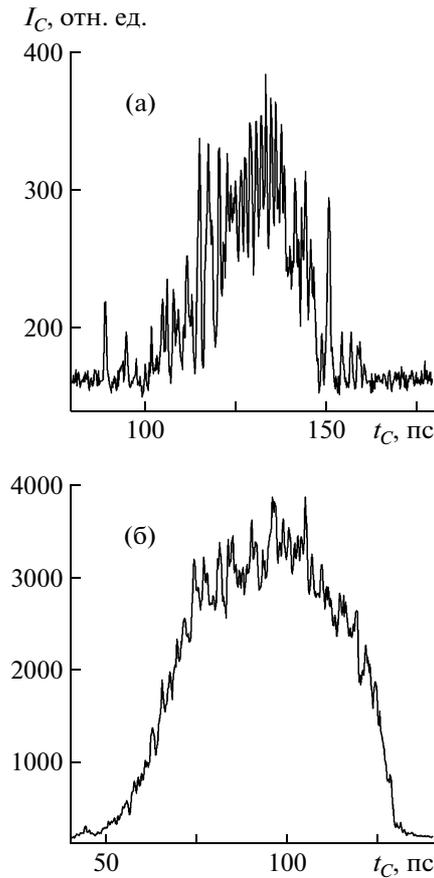


Рис. 3. Хронограммы световых импульсов с различной энергией, измеренных системой S&I: **а** – $A = 185$ отн. ед., $t_{0.5} = 32$ пс; **б** – $A = 3240$ отн. ед., $t_{0.5} = 56$ пс.

лен на рис. 4в. Видно, что максимум шумового спектра в данном случае соответствует частоте 0.4 ТГц. Шум с таким спектром затруднительно обнаружить при фемтосекундном тестировании камеры, поскольку согласно техническому описанию ширина измеренной в.а.ф. для стрик-камеры Ortronis составляет 2 пс, а для PS-1 – 1 ± 0.5 пс.

Изрезанность хронограммы пиками импульсных шумов серьезно затрудняет определение формы измеряемого импульса. Оценить погрешности измерений из-за наличия шумов можно, в принципе, из фурье-разложения хронограммы, но для практических целей удобнее пользоваться следующими параметрами.

Первый параметр A/N характеризует максимальную (для данной хронограммы) относительную погрешность измерения интенсивности света в фиксированный момент времени. Как иллюстрирует рис. 4а, A – это амплитуда зависимости $I = f(t_C)$, полученной сглаживанием $I_C - I_0 = f(t_C)$, где I_0 – пьедестал хронограммы (из-за темновых токов); N – максимальный скачок интенсивности I_C , выбираемый на хронограмме. Параметр A/N

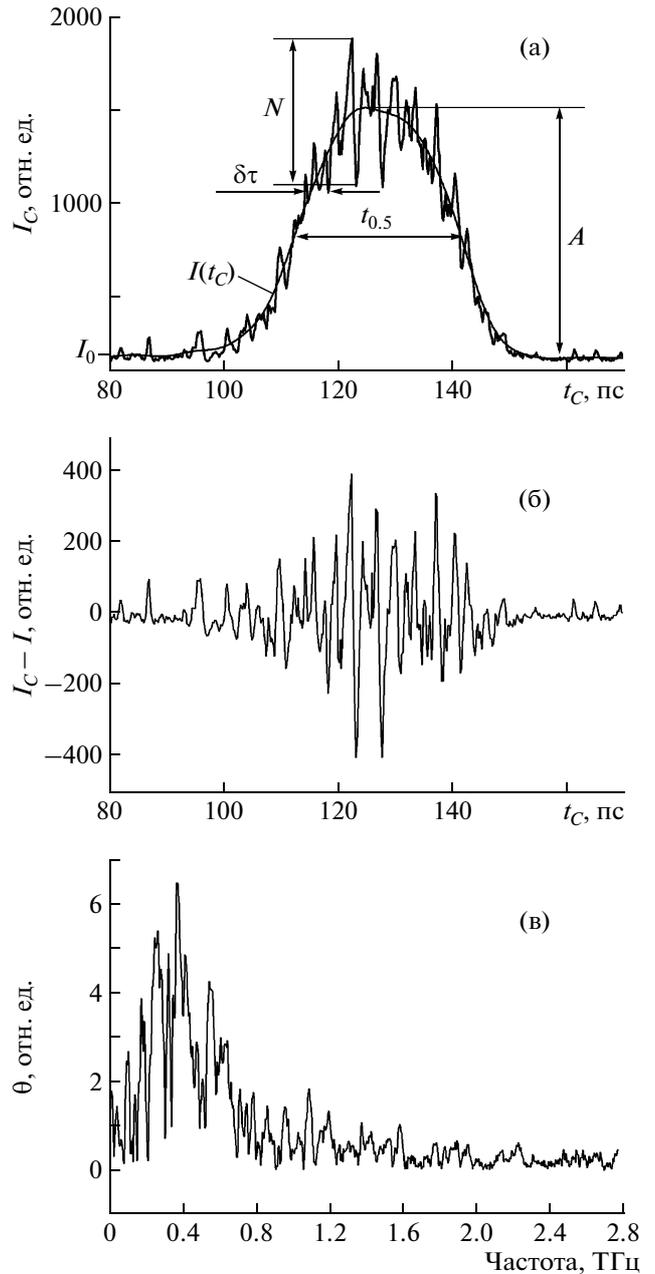


Рис. 4. **а** – экспериментальная хронограмма $I_C(t_C)$ светового импульса, измеренного системой S&I, и сглаженная хронограмма $I(t_C)$, где обозначены определяемые параметры погрешностей; **б** – разность между этими хронограммами – выделенный шум; **в** – спектр искажающего хронограмму шума.

аналогичен широко используемому отношению “сигнал/шум”.

Второй параметр $\delta\tau$ – это максимальная абсолютная погрешность определения момента времени, в который интенсивность света имеет фиксированное значение. Численно $\delta\tau$ выбирается из хронограммы как максимальная сумма ширины расположенных рядом шумовых пиков, пересе-

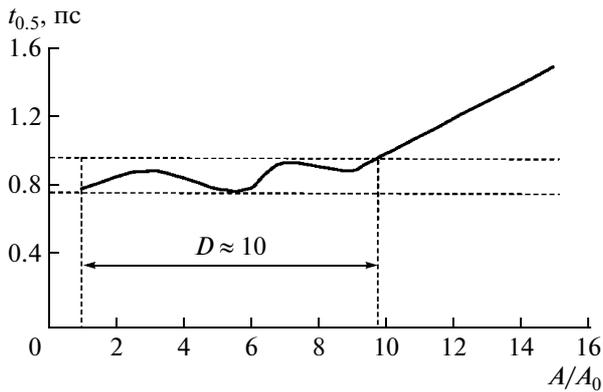


Рис. 5. Зависимость измеренной длительности $t_{0,5}$ (п.ш.п.в.) импульса, истинная длительность которого 120 фс, от нормированной амплитуды A/A_0 при шелевом методе заведения луча в стрик-камеру PS-1, где A_0 — минимальная амплитуда A , при которой можно определить $t_{0,5}$.

каемых горизонтальной линией $I_C = \text{const}$, параллельной оси абсцисс. Введение этого параметра существенно для оценки погрешности измерения временного хода импульса по фронту и спаду хронограммы, например, в области $I_C - I_0 = (0.2-0.8)A$.

Точность измерения длительности импульса характеризуют двумя другими параметрами: в.а.ф. и динамическим диапазоном D . Отличие измеренной длительности от длительности лазерного импульса обусловлено, в основном, разбросом начальных энергий и векторов скоростей фотоэлектронов и влиянием на траектории электронов в промежутке между фотокатодом и люминесцентным экраном кулоновского взаимодействия между частицами электронного пакета [2].

В зависимости от степени кулоновского взаимодействия режим измерений может быть близок к линейному или существенно нелинейным. Переход камеры в нелинейный режим определяют по заметному увеличению ширины в.а.ф. при увеличении энергии импульса фиксированной длительности.

Согласно принятому в настоящее время критерию [4], динамический диапазон стрик-камеры, работающей в режиме линейной развертки, определяется как отношение $\varepsilon_{\text{max}}/\varepsilon_{\text{min}}$, где ε_{min} — минимальная энергия тестирующего импульса, при которой на фоне шумов выделяется регистрируемый импульс и можно определить его длительность, ε_{max} — энергия импульса, измеренная длительность которого на 20% больше длительности, измеренной при ε_{min} .

Динамический диапазон D характеризует приблизительно линейную область работы стрик-камеры. Его значение, приводимое в технических характеристиках стрик-камер, определено из измерений фемтосекундных импульсов. При этом

значение D при тестировании стрик-камеры PS-1 импульсом длительностью 10 фс близко к значению, определенному при тестировании той же камеры импульсом длительностью 120 фс (см. рис. 5). Однако при увеличении длительности импульсов до ~ 10 пс прогнозировать величину динамического диапазона без опытных данных не представляется возможным.

В наших опытах под длительностью импульса по хронограмме принимается длительность $t_{0,5}$ (п.ш.п.в.) сглаженной хронограммы $I = f(t_C)$ на рис. 4а. Поскольку при изменении энергии лазерного импульса менялась его амплитуда, а пространственно-временная форма оставалась неизменной, то динамический диапазон определялся из соотношения $D = A_{\text{max}}/A_{\text{min}}$, где A_{min} — минимальная амплитуда A , при которой $A/N \geq 3$ (что позволяет определить $t_{0,5}$), A_{max} — амплитуда A , при которой измеренная длительность превышает на 20% длительность, измеренную при A_{min} . Таким образом, при определении динамического диапазона принимались в расчет только те хронограммы, у которых $A/N \geq 3$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Изменения параметра A/N при изменении амплитуды A иллюстрирует рис. 6. В исследованном диапазоне значений A наблюдается, в среднем, возрастание A/N при увеличении A , т.е. уменьшение относительной погрешности измерений интенсивности света. При этом для стрик-камеры PS-1 у верхней границы динамического диапазона значение $A/N = 9-13.5$ при шелевом методе существенно превышало $A/N = 4.8-3.8$ при точечном (измерение динамических диапазонов описано ниже). При измерениях системой S&I значение A/N достигало 4.5 при максимально измеряемой п.з.с.-камерой CoolSNAP амплитуде светового импульса 4000 отн. ед. Отметим, что относительные единицы для измерений системой S&I и для измерений стрик-камерой PS-1 отличаются, но соотношение между ними для данной работы принципиально и поэтому не определялось.

Изменение параметра δt с изменением амплитуды A для стрик-камеры PS-1 представлено на рис. 7. При шелевом методе обнаружилось, что δt приблизительно экспоненциально уменьшается при возрастании A , достигая уже в конце первой четверти динамического диапазона значения ~ 2 пс. При точечном методе δt также уменьшается с ростом амплитуды A , но только до значения ~ 5 пс. Для системы S&I значения δt оказались “разбросаны” в диапазоне 6–20 пс.

На рис. 8а, 8б представлены результаты измерений зависимости $t_{0,5} = f(A)$, позволяющие определить D стрик-камеры PS-1. При шелевом методе получено $D \approx 22$, что вдвое больше динамического

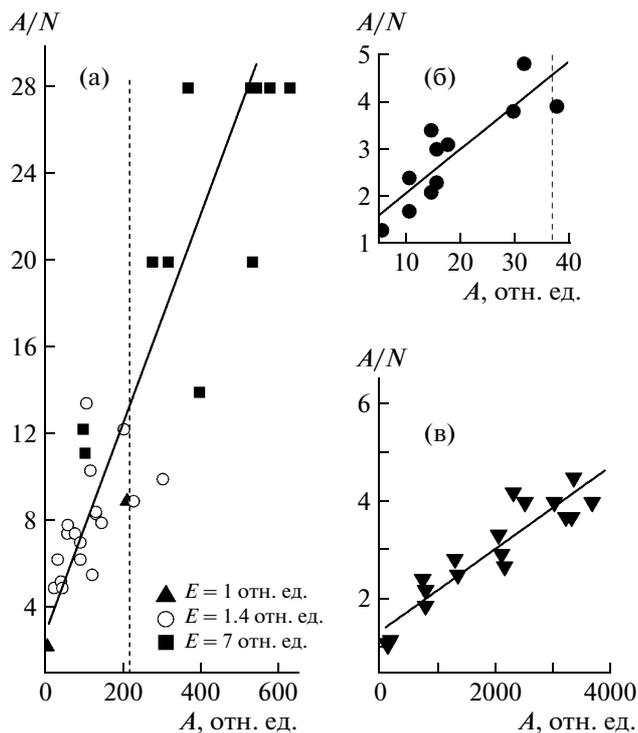


Рис. 6. Зависимость параметра A/N от амплитуды A при щелевом (а) и точечном (б) методах заведения луча в стрик-камеру PS-1, в – при измерениях системой S&I. Штриховой линией показана верхняя граница динамического диапазона.

диапазона при тестировании импульсами длительностью 10 фс и 120 фс. При точечном методе $D = 2.5$. Длительность импульса лазера $t_i = 22$ пс попадает в интервал значений $t_{0.5}$, находящихся внутри динамического диапазона.

Зависимость измеренной системой S&I длительности импульса $t_{0.5}$ от амплитуды A представлена на рис. 8в. В этой системе, в отличие от стрик-камеры PS-1, даже при минимальной амплитуде сигнала, когда параметр $A/N \approx 1$, длительность регистрируемого импульса (по аппроксимации – около 30 пс) более чем на 20% превышает длительность импульса лазера ($t_i = 22$ пс). В связи с этим, если основываться на критерии [4], представляется затруднительным корректно указать динамический диапазон системы S&I.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для стрик-камеры PS-1 при щелевом методе динамический диапазон оказался в ~9 раз больше, чем при точечном. В пределах динамического диапазона погрешности измерений, характеризуемые параметрами A/N и $\delta\tau$, оказались существенно меньше при щелевом методе, чем при точечном. Эти преимущества щелевого метода могут быть обусловлены следующим. При одинаковой

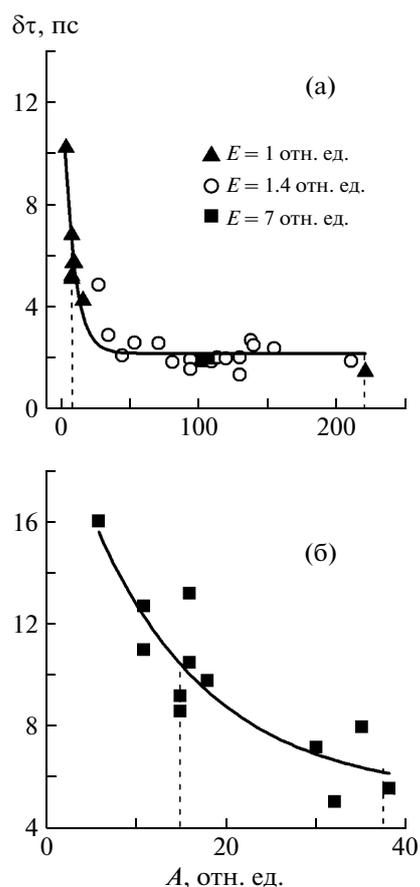


Рис. 7. Зависимость параметра $\delta\tau$ от амплитуды A при щелевом (а) и точечном (б) методах заведения луча в стрик-камеру PS-1. Сплошная линия: а – представляет зависимость $\delta\tau, \text{ пс} = 2.2 + 15.8\exp(-0.13A [\text{отн. ед.}])$; б – приведена для наглядности. Штриховой линией показаны границы динамического диапазона.

амплитуде A интенсивность излучения, падающего на фотокатод стрик-камеры, при щелевом методе намного меньше, чем при точечном, что приводит к снижению плотности фототока и соответственно снижению нелинейных эффектов [2]. Кроме того, однократное измерение щелевым методом аналогично суммированию k измерений точечным методом, где $k = S_s/S_p$, а S_s и S_p – площади сечений падающего на фотокатод луча при щелевом и точечном методах соответственно. Суммирование же, как известно, приводит к усреднению по шумам.

Можно предположить, что для измерений стрик-камерой PS-1 при щелевом методе произведение EW_s пропорционально величине интегрального заряда Q , возникающего в фотокатод. Обнаруживается, что внутри динамического диапазона и в некотором интервале над его верхней границей измеряемая длительность меняется при изменении EW_s , а значит при изменении заряда Q , по приблизительно параболическому закону. Это подтвер-

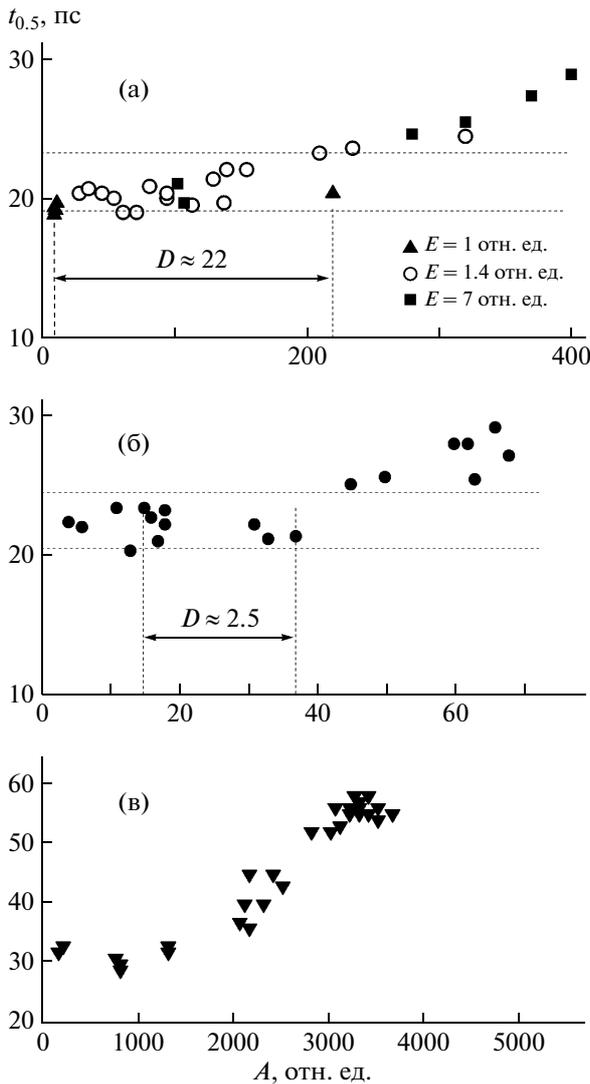


Рис. 8. Зависимость измеренной длительности $t_{0.5}$ импульса от амплитуды A при щелевом (а) и точечном (б) методах заведения луча в стрик-камеру PS-1, в – при измерениях системой S&I.

ждает рис. 9, на котором представлены полученные для трех значений E зависимости $t_{0.75}$, $t_{0.5}$, $t_{0.25}$ от EW_s , где $t_{0.75}$ и $t_{0.25}$ – ширина сглаженной хронограммы на тех уровнях, где $I_C - I_0$ равно $0.75A$ и $0.25A$ соответственно. Точки, составляющие эти зависимости и находящиеся как внутри динамического диапазона, так и в исследованной области амплитуд A вне его, ложатся с приемлемым разбросом на кривые, представляемые полиномом второй степени с разными значениями постоянной составляющей C .

Отличие кривой 2 – зависимости $t_{0.5} = f(EW_s)$ от прямой $t_{cp} = \text{const}$ (штриховая линия), соответствующей среднему значению длительности $t_{0.5}$ при нижней границе динамического диапазона, демонстрирует приблизительно параболический

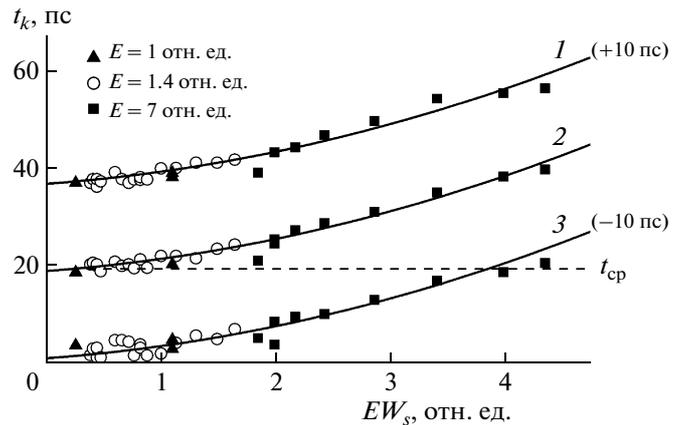


Рис. 9. Зависимость ширины хронограммы t_k на уровнях $I_C = I_0 + kA$ от произведения EW_s , измеренная стрик-камерой PS-1 при щелевом методе (точки). Кривые 1–3: $t_k = 0.8(EW_s)^2 + 1.7EW_s + C$, где $k = 0.25$ и $C = 27$ (1), 0.5 и 19 (2), 0.75 и 11 (3). Для наглядности кривые 1 и 3 сдвинуты по оси ординат относительно своего истинного положения на величину $+10$ пс и -10 пс соответственно.

характер возрастания ширины в.а.ф. стрик-камеры при увеличении фотогенерированного заряда Q . Это позволяет получить поправочный коэффициент $\chi = t_{0.5}/t_{cp} = f(EW_s)$, показывающий насколько уширена вдоль оси времени t_C хронограмма по сравнению с истинной длительностью импульса. Возможность такой коррекции позволяет получить правильную информацию об измеряемом импульсе из хронограмм с амплитудами, заметно превышающими верхнюю границу динамического диапазона. Это может существенно повысить точность определения временной формы импульса по сравнению с измерениями внутри динамического диапазона, поскольку A/N растет при увеличении амплитуды. Для сравнения, при амплитуде $A = 370$ отн. ед., почти вдвое превышающей верхнюю границу динамического диапазона, $A/N \approx 30$, т.е. примерно втрое больше, чем вблизи верхней границы динамического диапазона, а $\delta t \approx 2$ пс, как и в большей части динамического диапазона.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При измерениях огибающей пикосекундного импульса света с помощью пикосекундных стрик-камер установлен характер изменения погрешностей при увеличении амплитуды (энергии) измеряемых импульсов. Изучено влияние формы сечения светового луча на точность измерений. Обнаружены неизвестные ранее особенности: экспоненциальное уменьшение погрешности определения момента времени, в который интенсивность света имеет фиксированное значение, и такое уменьшение происходит при увеличении амплитуды

импульса фиксированной длительности; параболическое уширение временной аппаратной функции стрик-камеры при увеличении фотогенерированного пикосекундным импульсом заряда. Последнее открывает возможность проводить измерения за пределами верхней границы динамического диапазона с гораздо большей точностью, чем внутри диапазона.

Из двух протестированных в этой работе систем более удовлетворительными характеристиками для измерений формы пикосекундных импульсов обладает стрик-камера PS-1.

По-видимому, тестирование пикосекундных стрик-камер пикосекундными импульсами с включением полученных параметров в технический паспорт камер могло бы стимулировать работу по улучшению их характеристик.

Авторы выражают глубокую признательность Ю.В. Гуляеву, эффективно содействовавшему вы-

полнению настоящей работы, и Г.Д. Богомолу за подробное обсуждение рукописи статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сверхкороткие световые импульсы / Под ред. С. Шапиро. М.: Мир, 1981. С. 480.
2. Андреев А.Н., Дубовик А.С., Дегтярева В.П. и др. Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании быстропротекающих процессов. М.: Логос, 2002. С. 464.
3. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N. et al. // Book of Abstracts of 29th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics + 1st Workshop on Advanced Sensing and Imaging. Morioka, Japan, Department of Physics, Iwate Medical University, 2010. P. 2003 (Invited paper).
4. Thomas S.W. Proc. of the 13th International Congress on High-Speed Photography. Tokyo, Japan, SPIE, 1978. V. 189. P. 838.