

УДК 535.37, 535.2/.3, 621.38 С50, 621.375

КАЛИБРОВКА ПИКОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДИССЕКТОРА*

О. В. Анчугов¹, В. Л. Дорохов¹, Г. Я. Куркин¹, Э. И. Зинин¹,
П. А. Молявин¹, О. И. Мешков^{1,2}, Д. А. Шведов¹,
А. В. Петрожицкий¹, П. Б. Горностаев³, А. И. Заровский³,
Е. В. Пашков³, А. В. Смирнов³, М. Я. Щелев³

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
119991, Москва, ул. Вавилова, 38

E-mail: O.I.Meshkov@inp.nsk.su

Создан новый электронно-оптический диссектор на базе хронографического электронно-оптического прибора ПИФ-01, разработанного и изготовленного в Институте общей физики им. А. М. Прохорова (ИОФ) РАН. Приведены результаты статических измерений аппаратной функции диссектора, которые показали, что его временное разрешение может быть лучше 4 пс. Эти данные подтверждены прямыми измерениями на стенде ИОФ РАН с использованием фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

Ключевые слова: стрик-камера, диссектор, пикосекунда, титан-сапфировый лазер, оптическая диагностика, циклический ускоритель.

DOI: 10.15372/AUT20160314

Введение. Современные оптические диагностики широко применяются в экспериментах с синхротронным излучением (СИ) [1]. Практически все источники СИ используют стрик-камеры, зачастую с субпикосекундным временным разрешением, для измерения продольного профиля пучка в накопителе [2]. В 1960-х годах для оптической спектроскопии с микросекундным временным разрешением были предложены диссекторы [3]. Диссектор ЛИ-602, созданный в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО АН СССР в 1970-х годах, применялся для измерения продольного профиля пучка в циклическом накопителе на основе стробоскопического принципа. Его временное разрешение достигало 20 пс, а динамический диапазон позволял проводить эксперименты в счётном режиме фотонов при исследовании сцинтилляторов и регистрировать СИ в аналоговом режиме [4–7]. Источники СИ последнего поколения, в том числе лазеры на свободных электронах, требуют повышения временного разрешения прибора, по крайней мере на порядок. В диссекторе нового поколения было решено использовать хронографический электронно-оптический прибор ПИФ-01, разработанный в Институте общей физики им. А. М. Прохорова (ИОФ) АН СССР в 1980-х годах [8]. Стрик-камера PS-1/S1, созданная на его основе, предназначена для единичных измерений с временным разрешением около 1 пс [9–11]. Экспериментально проверенное временное разрешение этой камеры составляет $1 \pm 0,2$ пс при скорости развёртки $2 \cdot 10^{10}$ см/с и напряжённости электрического поля около фотокатода 3 кВ/мм.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00295).

Измерения осуществлялись фемтосекундным лазером на длинах волн 800 и 911 нм. Такого временного разрешения, если его удастся воспроизвести диссектором, достаточно для определения продольного распределения частиц в пучке на подавляющем большинстве циклических ускорителей электронов. Кроме того, только в ИОФ РАН сохранена технологическая цепочка, позволяющая изготавливать опытные образцы стрик-камер и диссекторов.

Основным эксплуатационным преимуществом диссектора перед стрик-камерой является способность непрерывной, круглосуточной работы, что требуется от любых диагностических методов, используемых на современных циклических ускорителях. Постоянный контроль за продольным профилем пучка осуществляется только на ускорителях, где установлен диссектор ЛИ-602. Например, на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М диссекторы работают без замен и существенных поломок с 1985 года.

Цель данной работы состоит в создании прибора аналогичной надёжности, но с лучшим временным разрешением.

Принцип действия диссектора. Конструкция и применение диссектора описаны в [1–7, 12]. Быстродействие прибора определяется его головной частью, аналогичной стрик-камере и состоящей из фотокаатода, ускоряющей сетки, электронной линзы, отклоняющих пластин и щелевой апертуры (рис. 1, *a*).

Отличие диссектора от стрик-камеры заключается в том, что он предназначен для регистрации периодических сигналов, например вспышек синхротронного излучения пучка в циклическом ускорителе либо импульсов лазера. Если на фотокатоде диссектора построено точечное изображение периодического источника света, а частота ВЧ-развёртки диссектора ν_{RF} синхронизована с частотой светового сигнала, то в плоскости щели диссектора образуется стационарное электронное распределение $Q(x)$, соответствующее временному распределению в световом импульсе. Типичная частота ВЧ-развёртки составляет десятки мегагерц. Энергия фотоэлектронов, достигших плоскости щели, равна 12 кВ в ПИФ-01/S1. Лишь малая доля электронов q , прошедших сквозь щель, попадает во вторичный элект-

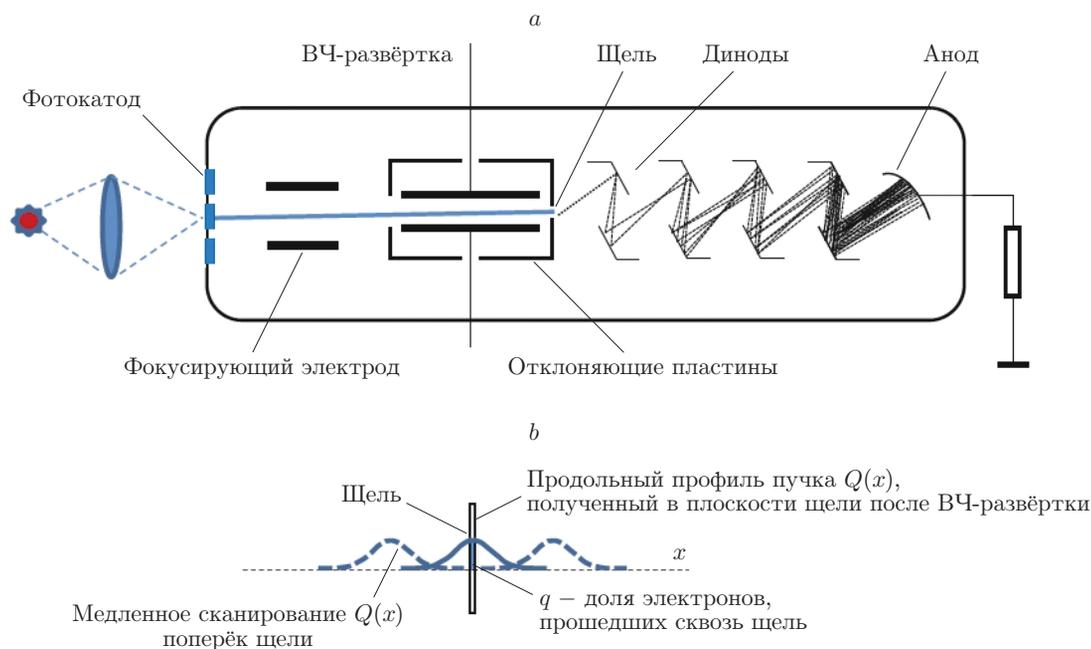


Рис. 1. Упрощённые схемы диссектора: устройства (*a*) и медленного сканирования продольного распределения $Q(x)$ поперёк щели диссектора (*b*)

ронный умножитель (ВЭУ). Для эффективной работы динодов ВЭУ энергия электронов понижается до нескольких сотен электронвольт с помощью алюминиевой плёнки толщиной 0,3 мкм, разделяющей две части диссектора [11].

Распределение $Q(x)$ медленно сканируется поперёк щели, время сканирования $t_{sl} \gg \gg 1/\nu_{RF}$ (рис. 1, b). Средний анодный ток на выходе ВЭУ пропорционален заряду, прошедшему через щель в данный момент сканирования, и повторяет распределение интенсивности светового импульса.

Медленное сканирование и временная шкала диссектора. Для сканирования распределения заряда, полученного в плоскости щели диссектора, можно менять сдвиг фазы между ВЧ-развёрткой и измеряемым импульсом [7]. В этом случае линейность развёртки определяется исключительно линейностью схемы, создающей фазовый сдвиг, а для временной калибровки диссектора необходимо использовать световые импульсы пикосекундной длительности.

Кроме того, существует возможность калибровки временной шкалы прибора, для которой применяется постоянный источник света, а для сканирования используется медленно меняющееся пилообразное напряжение U_{sl} , прикладываемое к отклоняющим пластинам вместе с ВЧ-развёрткой [12], при этом $U_{sl}^{max} > U_{RF}^{max}$.

Как правило, длительность пучка в циклическом ускорителе намного меньше периода обращения, поэтому сканирующее ВЧ-напряжение является n -й гармоникой частоты обращения ($n \gg 1$). До сих пор в экспериментах использовался диапазон частот 4–100 МГц в зависимости от ускорителя.

Простой способ калибровки временной шкалы — важное эксплуатационное преимущество диссектора. Если сфокусировать на его фотокатод постоянный точечный источник света, то в плоскости щели при включённой ВЧ-развёртке будет периодически появляться распределение заряда $Q_p(x)$, показанное на рис. 2, которое будет считываться при медленном сканировании [1]. Пространственный интервал между характерными метками и соответствующий ему измеряемый в результате сканирования временной интервал T_l зависят от U_{RF}^{max} , но временной масштаб диссектора T_s определяется однозначно, поскольку T_l согласуется с $T_s = 2/\omega_{RF} = T_{RF}/\pi$, где ω_{RF} — угловая частота ВЧ-развёртки, T_{RF} — период ВЧ-развёртки.

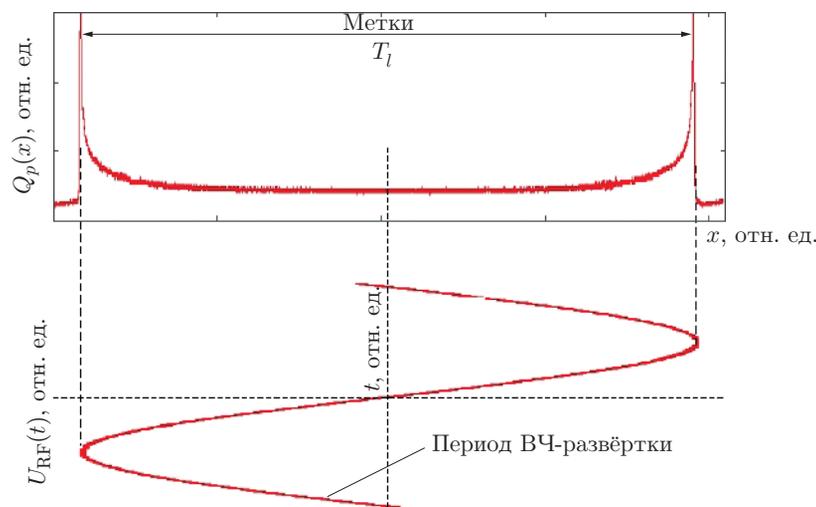


Рис. 2. Калибровка временной шкалы диссектора с помощью постоянного точечного источника света

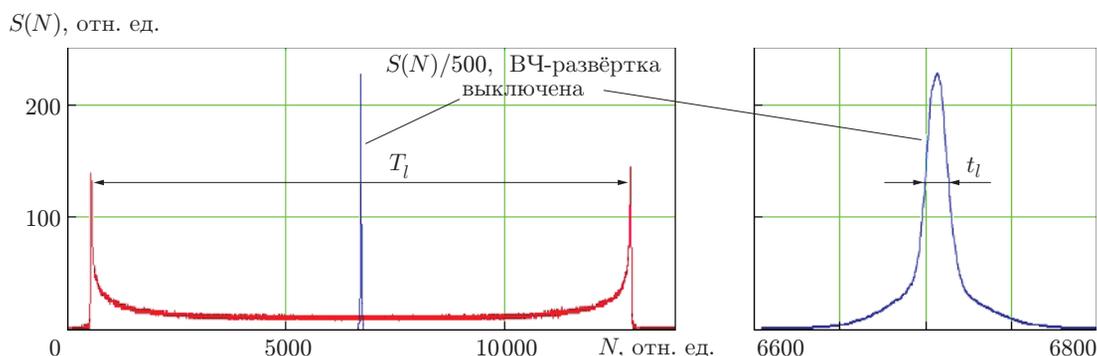


Рис. 3. Сигнал с анода диссектора от постоянного точечного источника света, спроецированного на фотокатод

При таком способе сканирования развёртка диссектора линейна лишь в середине временной шкалы и меняется в пределах ВЧ-периода. Ограничения точности калибровки, связанные с нелинейностью развёртки, обсуждаются в [7]. Тем не менее описываемый способ калибровки позволяет найти техническое временное разрешение диссектора, под которым подразумевается FWHM (Full Width of Half Maximum) аппаратной функции прибора, обусловленное качеством его электронно-оптической системы. Калибровка временной шкалы прибора с помощью регистрации излучения постоянного источника света регулярно применяется в текущей эксплуатации диссектора ЛИ-602 при измерении продольного профиля пучков на ускорителях.

Техническое временное разрешение диссектора определяется набором нескольких важных факторов:

- 1) энергетическим и угловым распределениями фотоэлектронов, испускаемых фотокатодом;
- 2) качеством электронного изображения в плоскости щели;
- 3) размером светового пятна на фотокатод;е;
- 4) амплитудой и частотой синусоидального сканирующего напряжения;
- 5) шириной щели.

Наиболее точный способ измерения временного разрешения диссектора — это определение его отклика на δ -образный световой импульс, что не всегда можно осуществить оперативно. Для света с длиной волны $\lambda = 1$ мкм вклад первого фактора оценивается как $\sigma_{\text{phys}}(s) \approx 10^{-11} E$ CGSE (где E — напряжённость электрического поля вблизи фотокатода) и составляет для ПИФ-01 около 0,3 пс [13]. Вклад технического временного разрешения, определяемого остальными перечисленными факторами, можно измерить, спроецировав постоянный точечный источник света на фотокатод диссектора и считав сигнал на выходе диссектора при включённой и выключенной ВЧ-развёртке (рис. 3).

Значение технического разрешения несложно вычислить: $t_{\text{tech}} = (T_{\text{RF}}/\pi)(t_l/T_l)$ где T_l — измеренный при медленном сканировании временной интервал между метками, t_l — FWHM сигнала диссектора при выключенной ВЧ-развёртке.

Экспериментальные результаты измерений технического разрешения диссектора [12] дали значение $t_l = 3,8 \pm 0,4$ пс, что позволило предположить возможность создания прибора с пикосекундным временным разрешением. Далее эта величина была непосредственно найдена с помощью фемтосекундного лазера.

Лазерная калибровка временного разрешения. Измерения временного разрешения диссектора проводились на специально созданной в ИОФ РАН лазерной установке по тестированию технических параметров разрабатываемых пикосекундных диссекторов методом синхронной электронно-оптической хронографии (рис. 4).

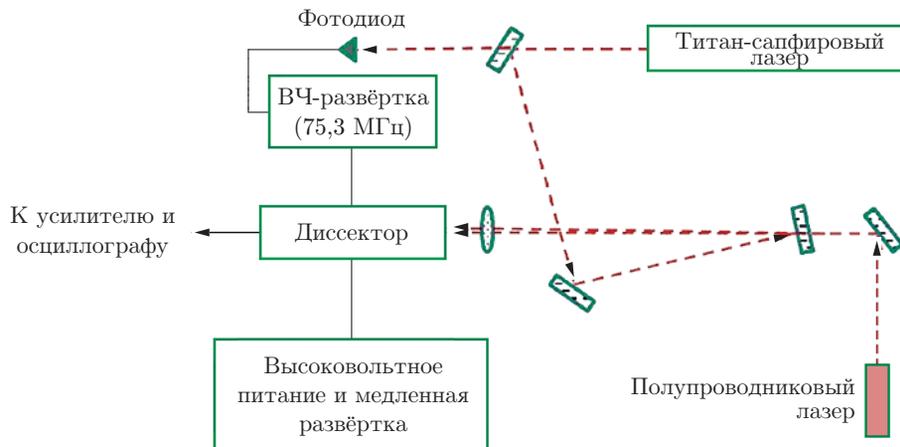


Рис. 4. Схема измерения временного разрешения диссектора

Титан-сапфировый лазер генерировал световые импульсы на длине волны 0,8 мкм длительностью 30 фс с частотой 75,3 МГц. Длительность световых импульсов была намного меньше ожидаемого временного разрешения диссектора и могла не учитываться при измерениях. Излучение титан-сапфирового лазера, отражённое от двух поверхностей плоскопараллельной пластины, фокусировалось на фотокатод диссектора. В результате на диссектор с частотой 75,3 МГц поступала пара световых импульсов, разделённых временным интервалом $\tau = 2dn/c$, где d — толщина стеклянной пластинки, $n = 1,51$ — коэффициент преломления стекла, c — скорость света. Нами использовались четыре пластинки различной толщины, соответствовавшей временному интервалу между импульсами 100; 52,1; 25,4 и 9,7 пс.

На отклоняющие пластины диссектора одновременно подавались периодическое ВЧ-напряжение с частотой 75,3 МГц и суммарной амплитудой до 1500 В и сканирующее пилообразное напряжение с частотой 50 Гц и амплитудой до 750 В. Высокочастотный генератор имел фазовую подстройку от быстрого фотодиода, регистрировавшего импульсы лазера. Сигнал диссектора регистрировался как непосредственно на выходе ВЭУ, так и после трансимпедансного усилителя с полосой 50 кГц.

Полупроводниковый лазер с постоянной мощностью излучения использовался для калибровки временной шкалы диссектора с помощью меток (рис. 5). При одновременной фокусировке излучения полупроводникового и титан-сапфирового лазеров на фотокатод диссектора на выходе прибора при включённой ВЧ-развёртке и подаче на отклоняющие пластины сканирующего пилообразного напряжения 50 Гц регистрируется характерный сигнал с метками [12]. Обратное вычисление временной шкалы диссектора, основанное на известном интервале между импульсами титан-сапфирового лазера, хорошо совпадает с расчётным значением $T_{RF}/\pi = 4,23$ нс, измеренное значение — $4,1 \pm 0,2$ нс. Положение исследуемого сигнала в пределах временной шкалы диссектора можно выбирать, изменяя фазу высокочастотного напряжения U_{RF} на отклоняющих пластинах диссектора. Развёртка диссектора линейна в середине временной шкалы, где достигается максимальное временное разрешение прибора. Заметим, что для получения предельного временного разрешения свет должен фокусироваться на фотокатод диссектора в пятно размером не более ширины щели на входе ВЭУ. В нашем случае $s = 0,04$ мм. Ожидаемая величина временного разрешения составляет [14]

$$\Delta t_{tr}(s) = \sqrt{(\Delta t_{temp})^2 + \left(\frac{\Delta x_{sp}}{V_{sw}}\right)^2} \approx 3 \text{ пс}, \quad \Delta t_{temp} = \sqrt{\frac{2m}{e}} \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{E} \sim 1 \text{ пс}.$$

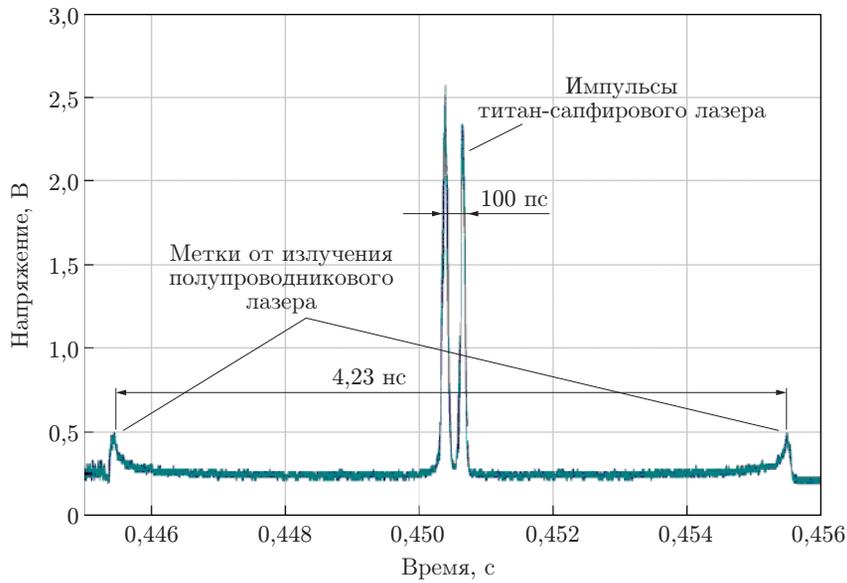


Рис. 5. Сигнал на выходе диссектора при одновременной фокусировке излучения двух лазеров на его фотокатод

Здесь $\Delta x_{sp} = sM$ ($s = 0,04$ мм — ширина щели диссектора, $M = 1,7$ — коэффициент электронно-оптического увеличения); $V_{sw} = 2\pi\nu_{RF}U_{RF}\xi$ — скорость развёртки, $\xi = 0,07$ мм/В — эффективность отклоняющих пластин для ПИФ-01; m, e — масса и заряд электрона; $E = 1778$ мм/В; $\varepsilon_0 = 0,25$ эВ — наивероятная энергия для энергетического распределения эмиссии фотоэлектронов.

Экспериментальные результаты. Измерение технического временного разрешения диссектора производилось при выключенном ВЧ-напряжении. На фотокатод прибора фокусировалось только излучение титан-сапфирового лазера. В процессе измерения оказалось, что полоса частот используемого нами усилителя мала для корректной регистрации сигнала с диссектора. Сигнал непосредственно на выходе ВЭУ имеет FWHM = 10 мкс, а на выходе усилителя уширяется до 18 мкс на полувысоте. Тем не менее при измерениях временного разрешения был использован усилитель, который работал как фильтр мощной помехи, создаваемой на выходе ВЭУ высокочастотным напряжением, прикладываемым к отклоняющим пластинам.

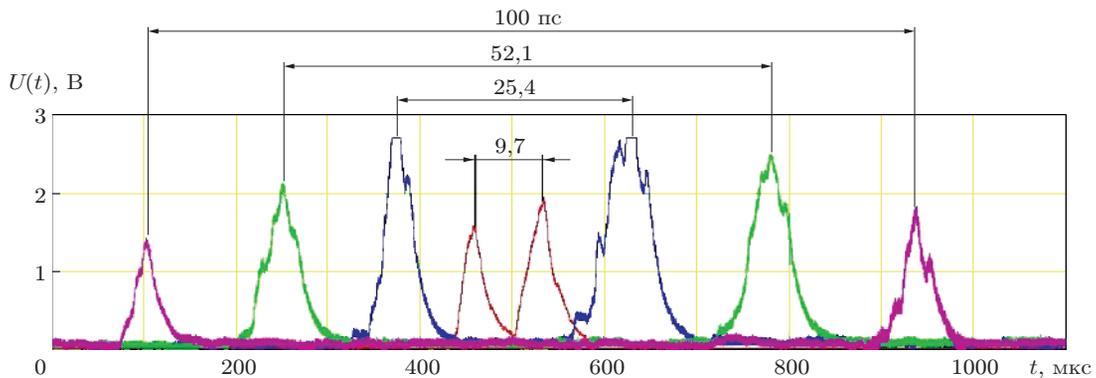


Рис. 6. Пары импульсов лазера, зарегистрированные диссектором, при различном временном интервале между ними

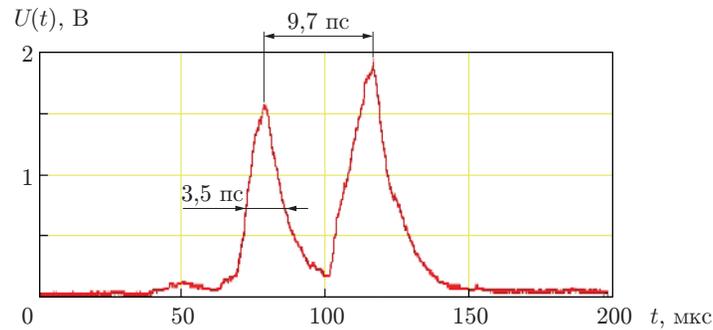


Рис. 7. Два лазерных импульса, разделённые временным интервалом 9,7 пс и зарегистрированные диссектором

При проведении калибровки необходимо добиваться максимального разделения регистрируемых сигналов для данной толщины стеклянной пластинки, настраивая резонансный контур диссектора и подбирая фазу U_{RF} (рис. 6). Временная шкала на рисунке соответствует реальному времени регистрации сигналов диссектором порядка 1 мс. Указанный на рисунке временной интервал между импульсами лазера рассчитан исходя из толщин стеклянных пластинок. На рис. 7 представлен лучший из достигнутых результатов. Экспериментально определённое временное разрешение диссектора $\text{FWHM} = 3,5 \text{ пс}$, средняя величина по всем парам импульсов составляет $4,5 \pm 0,6 \text{ пс}$.

Заключение. Таким образом, показана возможность достижения временного разрешения в пределах единиц пикосекунд с помощью диссектора, созданного на основе разработанного в ИОФ РАН электронно-оптического преобразователя ПИФ-01. Созданная также в отделе фотоэлектроники ИОФ РАН для измерения и калибровки временного разрешения пикосекундных диссекторов нового поколения установка с использованием излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера продемонстрировала свою эффективность и надёжность при тестировании диссекторов нового поколения с пикосекундным временным разрешением.

Авторы выражают благодарность участникам технологической цепочки: Г. П. Левиной, В. А. Макушиной, С. Р. Ивановой, Ю. М. Михалькову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вячеславов Л. Н., Иванцовский М. В., Мешков О. И. и др. Методы оптической диагностики электрон-позитронных пучков и взаимодействия плазмы с сильнофокусированным электронным пучком // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2012. **43**, вып. 2. С. 451–498.
2. Smaluk V. Particle Beam Diagnostics for Accelerators: Instruments and Methods. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. 288 p.
3. Диамант Л. М., Искольдский А. М., Кудряшов М. И., Нестерихин Ю. Е. Анализ пространственного разрешения двойного электронно-оптического преобразователя // Теплофизика высоких температур. 1970. **8**, № 1. С. 163–168.
4. Зинин Э. И., Коробейников Л. С., Кулипанов Г. Н. и др. Система управления и контроля параметров электронных пучков в электрон-позитронном накопителе ВЭП-1 // Атомная энергия. 1966. **20**, № 3. С. 220–223.
5. Zinin E. I. Stroboscopic method of electro-optical picosecond-resolution chronography and its application in synchrotron radiation experiments // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1983. **208**, Is. 1–3. P. 439–441.

6. **Огородников И. Н., Омельков С. И., Пустоваров В. А. и др.** Исследование новых сцинтилляционных материалов для регистрации нейтронов: кристаллы $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ // Вестн. УГТУ (УПИ). 2006. **5**, № 6. С. 269–277.
7. **Зинин Э. И.** Стробоскопический метод электронно-оптической хронографии с пикосекундным разрешением на основе диссектора с электростатической фокусировкой и отклонением. Новосибирск, 1981. 21 с. (Препр. /ИЯФ СО АН СССР; 81-84).
8. **Degtyareva V. P., Kulikov Yu. V., Monastyrski M. A. et al.** The new streak image tube PIF-01 // Proc. SPIE. 1985. **0491**. P. 239–242.
9. **Прохоров А. М., Воробьев Н. С., Лозовой В. И. и др.** Регистрация излучения Ti:сапфирового лазера с высоким временным и пространственным разрешением // Квантовая электроника. 2002. **32**, № 4. С. 283–284.
10. **Гаранин С. Г., Бельков С. А., Рогожников Г. С. и др.** Использование пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок // Квантовая электроника. 2014. **44**, № 8. С. 798–800.
11. **Агеева Н. В., Иванова С. Р., Комельков А. С. и др.** Тормозящие плёнки для пикосекундных диссекторов нового поколения // Автометрия. 2016. **52**, № 3. С. 100–107.
12. **Zinin E. I., Meshkov O. I.** Optical dissector for longitudinal beam profile measurement // Journ. Instrum. 2015. **10**, N 10. 10024.
13. **Zavoisky E. K., Fanchenko S. D.** Image converter high-speed photography with 10^{-9} – 10^{-14} sec time resolution // Appl. Opt. 1965. **4**, Is. 9. P. 1155–1167.
14. **Щелев М. Я.** Пико-фемто-аттосекундная фотоэлектроника (взгляд через полувековую «лупу времени») // УФН. 2012. **182**, № 6. С. 649–656.

Поступила в редакцию 1 декабря 2015 г.
