

## ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДИССЕКТОР СО СКРЕЩЕННОЙ РАЗВЕРТКОЙ

© 2020 г. С. В. Андреев<sup>а</sup>, Н. С. Воробьев<sup>а, \*</sup>, В. Л. Дорохов<sup>б</sup>, А. И. Заровский<sup>а</sup>,  
А. С. Комельков<sup>а</sup>, Г. Я. Куркин<sup>б</sup>, О. И. Мешков<sup>б,с,\*\*</sup>, А. В. Смирнов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

<sup>б</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>с</sup> Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

\*e-mail: vor@kapella.gpi.ru

\*\*e-mail: o.i.meshkov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 12.07.2019 г.

После доработки 12.07.2019 г.

Принята к публикации 02.08.2019 г.

На основе электронно-оптического преобразователя ПИФ-01 создан двухщелевой диссектор с пикосекундным временным разрешением, работающий в режиме скрещенной развертки. Диссектор предназначен для работы на источниках синхротронного излучения и электрон-позитронных коллайдерах при необходимости одновременной регистрации продольных профилей многобанчевых пучков, заполняющих от двух до нескольких сотен соседних сепаратрис кольца ускорителя. В результате проведенных динамических испытаний разработанного диссектора, выполненных на лазерной установке, было зарегистрировано с временным разрешением  $6 \pm 0.5$  пс два цуга световых импульсов, сдвинутых во времени друг относительно друга.

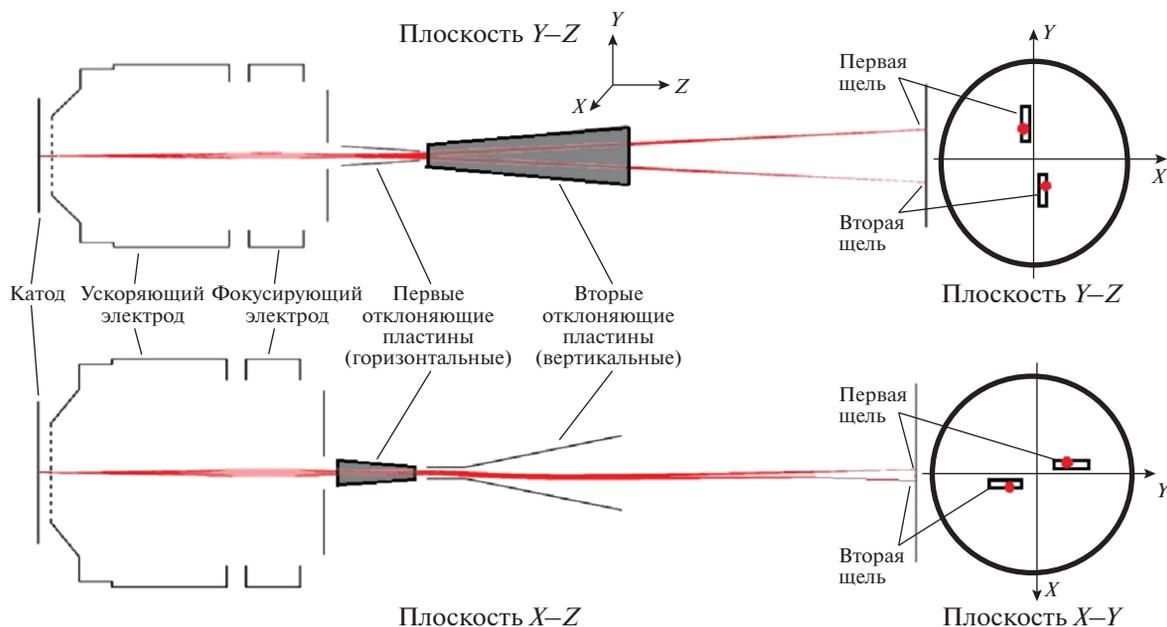
DOI: 10.31857/S0032816220010012

### ВВЕДЕНИЕ

Особенностью подавляющего большинства современных ускорителей электронов и позитронов является большое число банчей (сгустков) в пучке. Как правило, банчи заполняют более половины сепаратрис (орбит) ускорителя [1], что позволяет увеличить средний ток пучка и соответственно светимость коллайдера или поток фотонов источника синхротронного излучения (с.и.). Например, в пучке КИСИ (“Курчатовский источник синхротронного излучения”, Россия, Москва) содержится до 75 банчей, в ускорителе ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) можно накопить 992 банча, а в 27-километровом кольце протон-протонного коллайдера ЛНС помещается 1380 банчей. Максимальное число банчей в пучке составляет  $N = Pv_{RF}/c$ , где  $P$  — периметр орбиты ускорителя,  $v_{RF}$  — частота ускоряющего напряжения,  $c$  — скорость света. Характерный порядок числа электронов в одном банче  $\sim 10^9$  частиц. Длина банча в современных источниках с.и. варьируется в широких пределах: от долей миллиметров до нескольких сантиметров, т.е. длительность вспышки с.и., при помощи которой изме-

ряется продольный размер пучка, может меняться от единиц до десятков пикосекунд.

Контроль продольного распределения частиц в пучке необходим как при рутинной эксплуатации циклического ускорителя, так и при проведении экспериментов в области ускорительной физики. При этом желательно иметь возможность измерения продольного распределения (длины) в определенном (заданном) банче пучка. Это связано, в частности, с необходимостью подавления неустойчивостей разного рода, возникающих в многобанчевых пучках [2]. Для этой цели в ИЯФ СО РАН применяется электронно-оптический диссектор [3, 4]. Его последняя версия, созданная в сотрудничестве между ИОФ РАН и ИЯФ СО РАН, имеет временное разрешение  $2 \pm 0.5$  пс [5], что достаточно для использования диссектора на подавляющем большинстве современных циклических ускорителей электронов и позитронов. Однако актуальной остается задача измерения диссектором продольного профиля нужного банча. В качестве первого шага решения этой задачи нами предпринята попытка модернизировать конструкцию диссектора таким образом, чтобы



**Рис. 1.** Принцип действия двухщелевого диссектора с двумя парами отклоняющих пластин: 1-я пара (горизонтальные) отклоняет электронный пучок по вертикали, 2-я (вертикальные) – разворачивает по горизонтали.

получить возможность одновременного контроля продольных профилей двух банчей пучка. Такое разделение банчей будет весьма полезно для контроля пучка при рутинной работе ускорителя.

### ДИССЕКТОР

Основной частью разработанного диссектора является электронно-оптический преобразователь (э.о.п.) ПИФ-01, имеющий две пары пластин вертикального и горизонтального отклонения, расположенных перпендикулярно друг относительно друга. Вместо люминесцентного экрана э.о.п. установлена диафрагма с двумя анализирующими щелями, которые смещены относительно вертикальной и горизонтальной осей прибора (рис. 1). Вторичный электронный умножитель (в.э.у.), размещенный за диафрагмой, используется для регистрации и усиления исследуемых сигналов. Оба устройства совмещены в едином вакуумном объеме. Первая часть прибора отвечает за временное разрешение и за процесс разделения входных сигналов по щелям, вторая – за считывание световых импульсов.

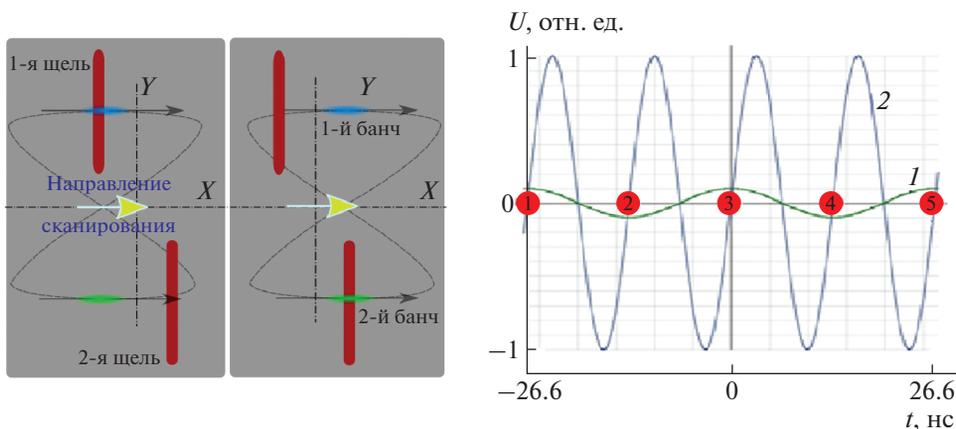
Для получения режима скрещенной развертки высокочастотные синусоидальные напряжения (в.ч.-напряжения) с кратными частотами подаются на две пары отклоняющих пластин преобразователя. Таким образом, при регистрации последовательности периодических световых импульсов в зависимости от расположения щелей и от отношения амплитуд, частот и фаз между в.ч.-напряжениями можно разделить сигналы по двум

щелям на выходе диссектора. Такое разделение импульсов позволяет регистрировать профили банчей из соседних сепаратрис ускорителя, которые налагаются друг на друга при отсутствии скрещенной развертки.

На рис. 1 схематично представлен принцип работы двухщелевого диссектора со скрещенной разверткой. Согласно этой схеме, измерение продольных профилей двух банчей в пучке, циркулирующем в ускорителе, происходит следующим образом. Предположим, что частота следования этих банчей составляет  $f_{бан}$  и они заполняют разные сепаратрисы, разделенные временным интервалом  $1/f_{бан}$ . Во время их движения в ускорителе формируются два импульса с.и., которые преобразуются в фотоэлектроны, попадая на фотокатод диссектора. Электроны, вылетевшие с фотокатода, ускоряются, после чего отклоняются первой парой пластин и разворачиваются второй парой в перпендикулярных направлениях.

В наших экспериментах роль двух банчей исполняли “нечетные” и “четные” лазерные импульсы в квазинепрерывном лазерном излучении (частота следования 75.3 МГц). Два синхронизированных между собой по фазе и с частотой следования банчей  $f_{бан}$  синусоидальных напряжения прикладываются к горизонтальным и вертикальным пластинам в частотном отношении  $0.5f_{бан}/f_{бан}$  соответственно (рис. 2).

Так же как и в случае диссектора с одной щелью, для регистрации сигнала применяется метод сканирования развернутого электронного изоб-



**Рис. 2.** Иллюстрация, поясняющая работу диссектора со скрещенной разверткой. Два приложенных к пластинам, разворачивающим пучок во взаимно перпендикулярных направлениях, синхронизированных по фазе синусоидальных напряжения с отношением частот  $0.5f_{\text{бан}}/f_{\text{бан}}$  (справа – кривые 1 и 2 соответственно) “рисуют” фигуру Лиссажу на поверхности диафрагмы с двумя щелями (слева). Выделенные красным цветом цифры 1–5 на рисунке справа – обозначения положения “нечетных” и “четных” банчей относительно в.ч.-разверток.

ражения [3] путем подачи на вертикальные пластины парафазного пилообразного напряжения низкой ( $\sim 50$  Гц) частоты (н.ч.-напряжения).

Путем математического моделирования расположение щелей [6] выбрано таким образом, чтобы избежать наложения регистрируемых сигналов от “четных” и “нечетных” импульсов по временной и пространственной осям диссектора (соответственно  $X$  и  $Y$  на рис. 1). Координаты электронного пучка на диафрагме:

$$y_i = \varepsilon_1 U_1 \sin\left(2\pi \frac{f_{\text{бан}}}{2} t_i + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$x_i = \varepsilon_2 U_2 \sin(2\pi f_{\text{бан}} t_i) + \varepsilon_2 k t_i.$$

Здесь  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – чувствительности первых горизонтальных и вторых вертикальных пластин;  $U_1$ ,  $U_2$  – амплитуды синусоидальных сигналов на первых и вторых пластинах;  $t_i = (i - 1)/f_{\text{бан}}$  – временной параметр, связанный с временем прихода  $i$ -го электронного пучка к пластинам и подобранный так, чтобы для первого электронного банча в момент прихода он был равен нулю (на практике это осуществляется подбором фаз сигналов для каждой пары пластин);  $k = 2U_2 f_{\text{нч}}$  – параметр, определяемый пилообразным сканирующим н.ч.-напряжением с частотой  $f_{\text{нч}}$ , которое подается на вторые пластины и управляет смещением электронного пучка вдоль координаты  $X$  на диафрагме.

Как видно из уравнений, в силу кратности  $f_{\text{бан}}$  и  $t_i$   $y$ -координата будет принимать два значения:  $\pm \varepsilon_1 U_1$ , и электронные банчи будут располагаться на нижней и верхней линиях параллельно оси  $X$  (рис. 2). В силу той же кратности частот первый член выражения для  $x_i$  будет для всех  $i$  равен нулю, и координата будет линейно меняться для каждо-

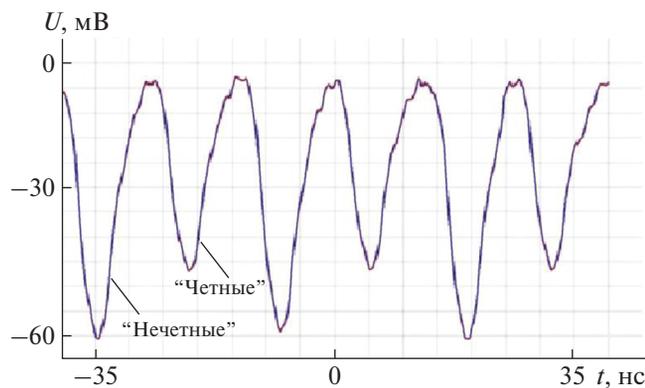
го последующего импульса за счет второго члена, определяемого н.ч.-сигналом с частотой  $f_{\text{нч}}$ .

Рисунок 2 демонстрирует траектории электронных банчей. “Нечетный” электронный импульс, проходя через первые горизонтальные пластины, отклоняется вверх на уровень первой щели и затем разворачивается во времени второй вертикальной парой пластин, попадая на первую щель. “Четный” импульс сначала отклоняется вниз первой парой до уровня второй щели, после чего также разворачивается в горизонтальном направлении. За счет сканирующего пилообразного напряжения с частотой 50 Гц [3], подаваемого на вторые пластины в дополнение к в.ч.-сигналу, происходит “дрейф” пучков в направлении  $X$ , и начиная с некоторого момента электроны попадают только в нижнюю щель. Далее процедура повторяется.

Таким образом, при правильно подобранных значениях амплитуд и фаз синусоидальных напряжений, приложенных к горизонтальным и вертикальным пластинам и синхронизированных с частотой следования банчей, первая щель пропускает только “нечетные” электронные импульсы, а вторая – только “четные”.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Проверка работоспособности диссектора и измерения его временного разрешения проводились на установке, подробно описанной в [4, 5] и включающей в себя фемтосекундный лазер на Тi-сапфире ( $\lambda = 800$  нм,  $\tau_{\text{имп}} = 30$  фс), работающий в квазинепрерывном режиме с частотой повторения 75.3 МГц ( $f_{\text{бан}}$ ). В конструкцию э.о.п. разработанного диссектора по сравнению с описанным в [5] были внесены небольшие изменения. Помимо



**Рис. 3.** Осциллограмма зарегистрированных в.э.у. лазерных импульсов, прошедших через обе щели диссектора за счет приложенного к горизонтальным пластинам напряжения частотой 37.15 МГц. Временное разрешение в.э.у. ~5 нс.

установки диафрагмы с двумя щелями, были изменены размеры вторых вертикальных отклоняющих пластин. Это хотя и привело к снижению чувствительности отклонения до 0.07 мм/В (0.1 мм/В в [5]), тем не менее, повысило воспроизводимость полученных результатов.

В электрическую схему диссектора был добавлен генератор, формирующий синхронизированное с частотой следования лазерных импульсов выходное синусоидальное напряжение с частотой 37.15 МГц, с регулируемой амплитудой (от 0 до 100 В) и фазой выходного напряжения. Напряжение подавалось на первые горизонтальные отклоняющие пластины диссектора. Все другие параметры электрических сигналов управления работой диссектора остались без изменения. На вертикальные отклоняющие пластины подавалось синхронизированное с частотой импульсов в.ч.-напряжение амплитудой до 1000 В, частотой 75.3 МГц, а также сканирующее парафазное пилообразное н.ч.-напряжение с частотой ~50 Гц.

В первой части эксперимента входное лазерное излучение отображалось на фотокатод диссектора цилиндрической линзой в виде узкой полоски, параллельной временной оси *X*, и с шириной, меньшей, чем расстояние между щелями в направлении оси *Y*. При работе диссектора в отсутствие напряжений на отклоняющих пластинах можно попеременно наблюдать на осциллографе сигнал с в.э.у. как от первой, так и от второй щели, перемещая лазерный луч по вертикали. Далее, выбирая местоположение полоски на фотокатод так, чтобы ее электронное изображение находилось между щелями, и подавая на горизонтальные пластины в.ч.-напряжение амплитудой 70–100 В с частотой 37.15 МГц, получаем на осциллографе периодический сигнал с частотой лазерных импульсов 75.3 МГц. Электронное изображение бу-

дет попадать то в одну, то в другую щель. Различие амплитуд “нечетных” и “четных” импульсов создается специально смещением лазерного луча на фотокатод таким образом, чтобы интенсивности электронных импульсов, прошедших через щели, были разными. Также это различие можно получать за счет разных ширин первой и второй щелей (рис. 3).

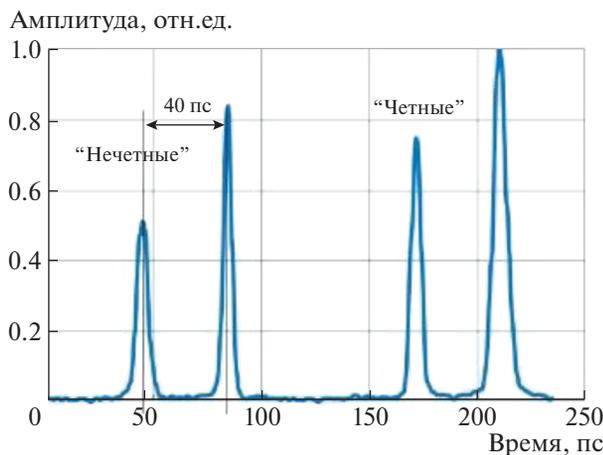
Измерение временного разрешения диссектора, включенного в рабочий режим, проводилось по известной методике путем отражения лазерного излучения от двух поверхностей плоскопараллельной пластинки [4]. В нашем случае отраженный от стеклянной пластинки толщиной 4 мм лазерный луч фокусировался сферической линзой на фотокатод диссектора. В результате пара “нечетных” электронных импульсов, разделенных временным интервалом  $t = 2dn/c$  (*d* – толщина пластинки, *n* – показатель преломления стекла, *c* – скорость света), проходила через первую щель, а пара “четных” импульсов, разделенных тем же интервалом, – через вторую щель. На рис. 4 представлена осциллограмма импульсов, зарегистрированных диссектором со скрещенной разверткой. В этом случае сигнал с в.э.у. регистрировался после трансимпедансного низкочастотного усилителя и поэтому имел положительную полярность. Средняя величина временного разрешения, полученная в результате выполненных экспериментов, оказалось равной  $6 \pm 0.5$  пс. Заметим, что временной масштаб на рис. 4 получается из временной калибровки шкалы диссектора [4]. Реальная длительность сканирования составляет десятки миллисекунд.

Следует заметить, что ухудшение временного разрешения двухщелевого диссектора по сравнению с однощелевым [5] объясняется увеличением как технического временного разрешения из-за уменьшения чувствительности вертикальных отклоняющих пластин, так и астигматизма отклонения из-за внеосевого расположения щелей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе электронно-оптического преобразователя создан диссектор со скрещенной разверткой с временным разрешением единицы пикосекунд. Проведенные испытания созданного диссектора показали, что он может быть применен на циклических ускорителях электронов и позитронов, работающих в режиме многобанчевых пучков.

Следует отметить, что дальнейшее развитие этого направления предполагает создание на базе э.о.п. ПИФ-01 трехщелевого диссектора со скрещенной разверткой. В этом случае третья щель, параллельная двум боковым щелям, располагается между ними в центре щелевой диафрагмы на



**Рис. 4.** Оциллограмма импульсов, зарегистрированных диссектором со скрещенной разверткой. Две пары сигналов образуются из-за распределения импульсов лазера между двумя щелями.

пересечении осей  $X$  и  $Y$ . Прикладывая синусоидальное напряжение частотой  $0.25f_{\text{бан}}$  к первым горизонтальным пластинам диссектора, можно осуществить режим последовательного прохождения банчей через все щели и таким образом регистрировать продольные профили пучков, заполняющих три сепаратрисы. Более того, при соответствующем режиме включения такой прибор может работать как стандартный однощелевой, так и двух- или трехщелевой диссектор.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников отдела фотоэлектроники ИОФ РАН Г.П. Левину и Ю.М. Михалькова за помощь при разработке и изготовлении электронно-вакуумной части диссектора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашков П.Т. Физика пучка в кольцевых ускорителях. М.: Физматлит, 2006.
2. Смалюк В.В. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2012. Т. 43. Вып. 2. С. 401.
3. Zinin E I. // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. 1983. V. 208. Is. 1–3. P. 439. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)91165-1](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)91165-1)
4. Анчугов О.В., Дорохов В.Л., Куркин Г.Я., Зинин Э.И., Молявин П.А., Мешков О.И., Шведов Д.А., Петрожицкий А.В., Горностаев П.Б., Заровский А.И., Шашков Е.В., Смирнов А.В., Щелев М.Я. // Автометрия. 2016. Т. 52. № 3. С. 108.
5. Андреев С.В., Анчугов О.В., Воробьев Н.С., Дорохов В.Л., Заровский А.И., Комельков А.С., Крутихин С.А., Куркин Г.Я., Малютин Д.А., Матвеев А.В., Мешков О.И., Смирнов А.В., Шашков Е.В. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 75. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020022>
6. Monastyrskiy M.A., Greenfield D.E., Tarasov V.A. // Software Demonstrations. Abstract Book. "СРО-7" International Conference. Cambridge UK, 2006. P. 23.