

ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДИССЕКТОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. С. В. Андреев^а, О. В. Анчугов^б, Н. С. Воробьев^а, В. Л. Дорохов^б,
А. И. Заровский^а, А. С. Комельков^а, С. А. Крутин^б, Г. Я. Куркин^б, Д. А. Малютин^с,
А. В. Матвеев^с, О. И. Мешков^{б, д}, А. В. Смирнов^{а, *}, Е. В. Шашков^а

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

^б Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^с Helmholtz-Zentrum Berlin, Berlin, Germany

^д Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

* e-mail: flint_as@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2018 г.

После доработки 27.04.2018 г.

Принята к публикации 30.07.2018 г.

На базе модифицированного электронно-оптического преобразователя ПИФ-01 разработан диссектор нового поколения, предназначенный для временной диагностики пучков заряженных частиц в ускорителях, и изготовлены его экспериментальные образцы. В результате тестовых динамических испытаний на лазерной установке получено временное разрешение ~ 2 пс, что более чем на порядок лучше соответствующего параметра существующего диссектора ЛИ-602. Экспериментальные образцы нового диссектора успешно опробованы в экспериментах на ускорителе MLS (Metrology Light Source, Берлин, Германия).

DOI: 10.1134/S0032816219020022

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН на протяжении многих лет в качестве постоянно действующей диагностики для продольного (временного) распределения заряженных частиц используется диссектор ЛИ-602, разработанный в 70-х годах [1]. Этот прибор создавался для временных исследований быстропротекающих периодических процессов субнаносекундной и пикосекундной длительности и поэтому оказался весьма подходящим для регистрации синхротронного излучения, по параметрам которого можно судить о временных характеристиках пучков заряженных частиц в ускорителе. Контроль временного распределения в пучке всегда был весьма важен при исследовании разного рода быстрых неустойчивостей, таких как эффекты встречи, нелинейная динамика пучков, квадрупольные неустойчивости и т.п.

В настоящее время диссектор ЛИ-602 используется для штатных измерений временного профиля электронных и позитронных пучков на коллайдерах ИЯФ и других подобных установках. Его временное разрешение не превосходит 20–30 пс, что вполне достаточно для диагностики продольного профиля пучка на подобных ускорителях.

К сожалению, подобного рода приборы больше не производятся не только в России, но и во всем мире. Кроме того, в последние годы, в связи с вводом в строй современных ускорителей, временного разрешения, которое обеспечивал диссектор ЛИ-602, зачастую недостаточно. Сейчас необходимо иметь прибор с разрешением в единицы пикосекунд и менее. При решении данной задачи весьма полезным оказался опыт создания электронно-оптической камеры (э.о.к.) с временным разрешением ~ 1 пс [2]. Подобные камеры, которые нашли широкое применение в физическом эксперименте [3], на протяжении многих лет разрабатываются в ИОФ РАН. Наиболее востребованная э.о.к с линейной разверткой модели PS-1/S1 (стрик-камера) построена на базе электронно-оптического преобразователя (э.о.п.) ПИФ-01, имеющего величину расчетного предельного временного разрешения ~ 0.5 пс [4]. Именно этот э.о.п. и был взят за основу для создания нового диссектора с разрешением в единицы пикосекунд.

ДИССЕКТОР

Разработанный диссектор нового поколения состоит из э.о.п. ПИФ-01 без люминесцентного



Рис. 1. Внешний вид электронно-вакуумной части диссектора.

экрана и фотоэлектронного умножителя, называемого вторичным электронным умножителем (в.э.у.), с анализирующей щелью вместо катода. Оба устройства совмещены в едином вакуумном объеме (рис. 1). Конструктивно прибор собирается таким образом, чтобы анализирующая щель совпала с плоскостью удаленного экрана ПИФ-01. Первая часть прибора отвечает за временное разрешение прибора, вторая – за считывание получаемой информации методом электронно-оптической хронографии [5]. В качестве в.э.у. использовались диодные умножительные системы от диссектора ЛИ-602, либо электронные умножители, специально изготовленные в ООО “Электрон-Комплект” (Санкт-Петербург) и НПО “Экран” (Новосибирск).

Главное отличие диссектора от э.о.п. ПИФ-01, работающего в режиме линейной развертки, заключается в его способности регистрировать ультракороткие периодические сигналы (например, лазерные импульсы, синхротронное излучение пучка заряженных частиц в циклическом ускорителе и т.п.). Если на фотокатоде диссектора сформировано изображение периодического источника света и частота его высокочастотной (в.ч.) развертки диссектора жестко синхронизована с частотой сигнала излучения, то в плоскости анализирующей щели диссектора формируется квазистационарное электронное распределение, соответствующее временному распределению в исследуемом импульсе. Типичная в.ч.-частота развертки составляет десятки мегагерц. Это электронное распределение сканируется поперек щели пилообразным низкочастотным (н.ч.) напряжением, также приложенным к пластинам развертки. Электроны, прошедшие сквозь щель, попадают в в.э.у. Средний анодный ток на его выходе пропорционален заряду, прошедшему через щель в данный момент сканирования, и соответственно повторяет распределение интенсивности светового импульса.

Для эффективной работы диодов в.э.у. энергия электронов понижается до нескольких десятков электронвольт с помощью тормозящей алюминиевой пленки толщиной 0.4 мкм, расположенной сразу за анализирующей щелью диссектора [6].

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 2. На отклоняющие пластины конденсаторного типа, предназначенные для развертки изображения исследуемого процесса, подается синусоидальное напряжение в.ч. с периодом, равным или кратным периоду исследуемого процесса (порядка нескольких десятков мегагерц). Сканирование развернутого электронного изображения происходит в направлении, поперечном анализирующей щели, с помощью пилообразного напряжения с частотой несколько десятков герц. Это напряжение, также подаваемое на пластины развертки, осуществляет фазовую модуляцию в.ч.-напряжения. Подробное описание принципа работы диссектора можно найти в [7].

Одним из главных параметров разработанного диссектора является его временное разрешение. Оно в основном определяется его величиной в преобразователе ПИФ-01. Ширина анализирующей щели, которая ответственна за считывание сигнала, выбирается таким образом, чтобы ее размер был существенно меньше предполагаемой ширины изображения электронного пучка в плоскости щели, поэтому вклад ширины щели во временное разрешение мал.

В общем случае временное разрешение характеризует способность прибора отдельно регистрировать события, следующие друг за другом через короткие промежутки времени. На практике временное разрешение диссектора есть не что иное, как величина временной аппаратной функции, которая описывает его реакцию на входные оптические импульсы бесконечно малой длительности (δ -импульсы), повторяющиеся или кратные частоте его работы, и является универсальной характеристикой прибора.

В наших экспериментальных работах было протестировано несколько изготовленных диссекторов. Измеренное временное разрешение этих приборов определялось как его отклик на повторяющиеся лазерные импульсы длительностью 30 фс, которые можно с хорошей точностью считать δ -импульсами для ожидаемого временного разрешения (порядка единиц пикосекунд). В этих ра-

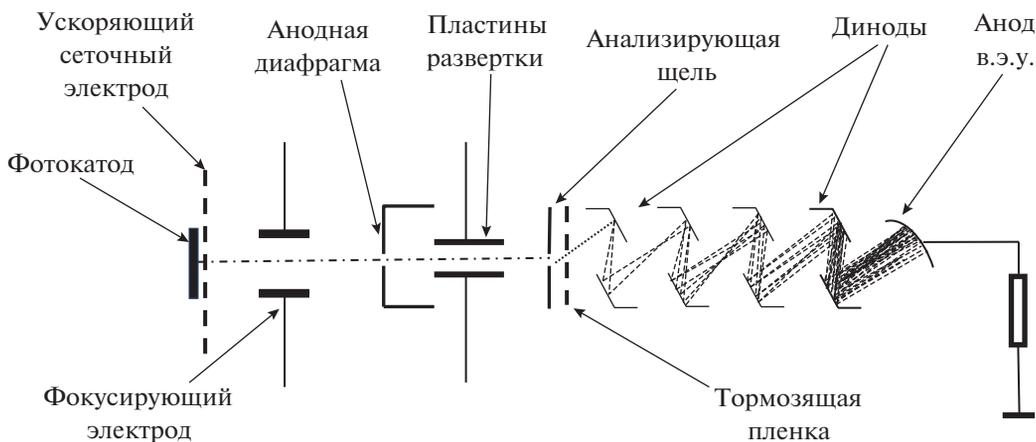


Рис. 2. Принципиальная схема электронно-оптического диссектора.

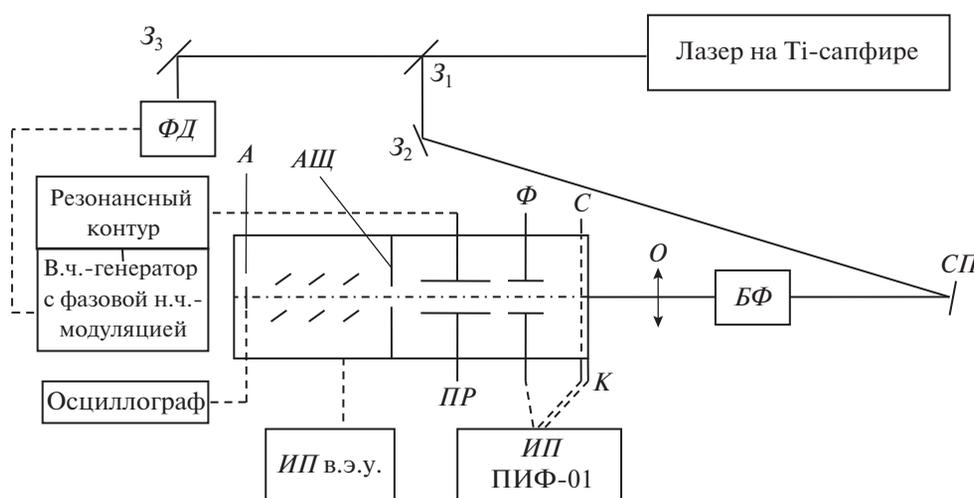


Рис. 3. Схема эксперимента по измерению временного разрешения диссектора. Z_1 – Z_3 – поворотные зеркала (Z_1 – полупрозрачное), СП – стеклянная пластина, БФ – блок фильтров, О – объектив, К – катод, С – ускоряющий сеточный электрод, Ф – фокусирующий электрод, ПР – пластины развертки, ИП – источники питания, АШ – анализирующая щель, А – анод в.э.у.

ботах был использован разработанный в ИЯФ генератор в.ч.-напряжения с частотой $f \sim 75.3$ МГц, соответствующей частоте следования лазерных импульсов. Внешняя фазовая модуляция осуществлялась пилообразным напряжением амплитудой ~ 800 В с частотой следования 50 Гц.

Измерения временного разрешения модернизированного диссектора проводились на лазерной установке (рис. 3). Титан-сапфировый лазер генерировал световые импульсы на длине волны 0.8 мкм длительностью 30 фс с частотой повторения 75.3 МГц, равной частоте в.ч.-развертки. Длительность одиночного импульса была намного меньше ожидаемого временного разрешения диссектора и поэтому не учитывалась при изме-

рениях. На отклоняющие пластины чувствительностью 0.1 мм/В подавалось парафазное в.ч.-напряжение с суммарной амплитудой $U_{вч} \sim 1000$ В от высокочастотного генератора с фазовой подстройкой и внешней фазовой модуляцией, которая осуществлялась пилообразным напряжением амплитудой ~ 800 В с частотой следования 50 Гц. Генератор был синхронизован сигналом от быстрого фотодиода, на который подавалась часть лазерного излучения. Выходной сигнал регистрировался осциллографом как непосредственно на выходе в.э.у., так и после трансимпедансного усилителя с полосой 500 кГц.

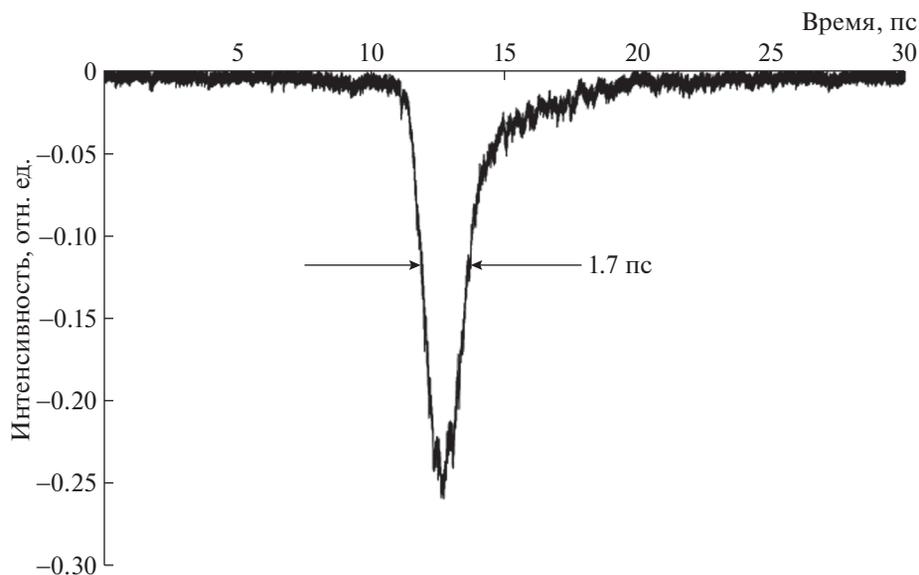


Рис. 4. Осциллограмма импульса, зарегистрированного диссектором.

Для калибровки временной шкалы осциллографа излучение титан-сапфирового лазера, отраженное от двух поверхностей плоскопараллельной стеклянной пластины *СП*, фокусировалось на фотокатод диссектора (рис. 3). В результате на входе диссектора образуются два цуга световых импульсов, “сдвинутых” друг относительно друга на время $t = 2dn/c$, где d – толщина стеклянной пластины, $n = 1.5$ – коэффициент преломления стекла, c – скорость света.

Временной интервал между двумя зарегистрированными импульсами на шкале осциллографа соответствовал реальному интервалу между световыми цугами импульсов и, таким образом, осуществлялась калибровка системы считывания, включающая в себя в.э.у. и осциллограф.

При измерении временного разрешения вместо стеклянной пластинки *СП* устанавливалось глухое зеркало. Измерения временного разрешения проводились для нескольких диссекторов, отличающихся фотокатодами разных типов, а также чувствительностью отклоняющей системы. С учетом проведенной калибровки на рис. 4 представлена зарегистрированная осциллограмма импульса одного из диссекторов с модифицированной отклоняющей системой. Наилучшее значение временного разрешения составило 2 ± 0.5 пс.

Основные характеристики разработанного диссектора: тип фотокатода – S20; временное разрешение 2–3 пс; спектральная чувствительность ($\lambda = 800$ нм) – 0.3 мА/Вт, интегральная чувствительность – 0.22 мА/лм; напряжение промежутка катод–сетка – 2.6 кВ/мм; коэффициент усиления в.э.у. – $6.3 \cdot 10^4$.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДИССЕКТОРА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ MLS

Разработанный диссектор, имеющий временное разрешение ~ 5 пс, был испытан на ускорителе MLS (Metrology Light Source, Берлин, Германия) [8]. В эксперименте регистрировалось синхротронное излучение в видимом диапазоне, выходящее из ондулятора установки. Диссектор был установлен на одном оптическом столе со стрик-камерой Hamamatsu C10910, имеющей предельное временное разрешение ~ 2.5 пс, и являющейся устройством штатной оптической диагностики ускорителя MLS. Оба прибора использовались для сравнительных измерений продольной длины пучка в режиме работы ускорителя с одним сгустком электронов.

Частота в.ч.-развертки диссектора была равна $f = 93.5$ МГц, что соответствовало 15-й гармонике частоты обращения пучка. Временная шкала диссектора калибровалась стандартным способом, с помощью засветки фотокатода постоянным источником света [5]. Временная аппаратная функция диссектора определялась остротой фокусировки света на фотокатод. Нам удалось получить полуширину аппаратной функции ~ 6 пс, т.е. хуже, чем в измерениях на стенде с использованием лазера.

Для демонстрации возможностей применения диссектора в экспериментах на ускорителях было измерено несколько зависимостей длины пучка электронов в MLS от различных параметров.

На рис. 5 показано несколько продольных профилей пучка в зависимости от величины ускоряющего напряжения U_{RF} . При уменьшении

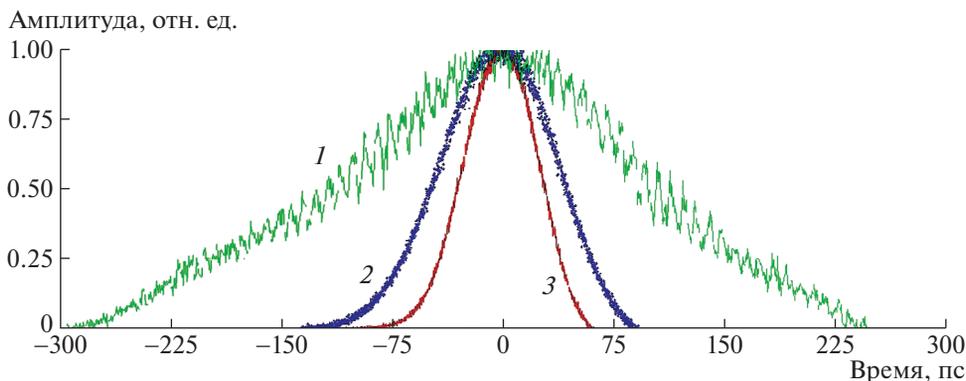


Рис. 5. Продольный профиль пучка в зависимости от ускоряющего напряжения на резонаторе MLS, $I_{\text{пучка}} = 1.35$ мА. Ускоряющее напряжение U_{RF} , кВ: 37 (1), 149 (2), 461 (3).

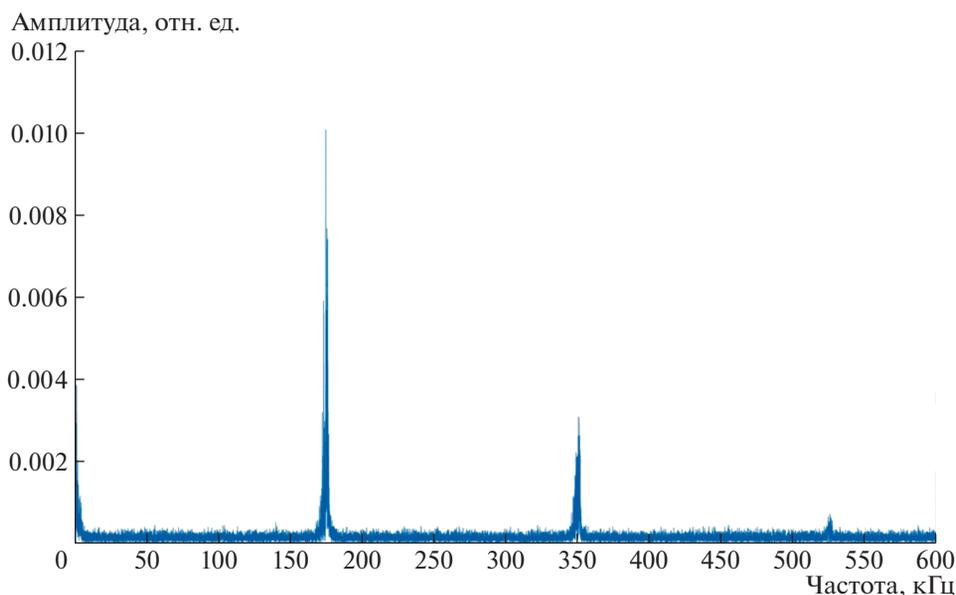


Рис. 6. Спектр синхротронных колебаний.

напряжения на резонаторе ниже некоторого порога пучок начинает испытывать синхротронные колебания, отчетливо проявляющиеся в искажениях его профиля, регистрируемого диссектором. Прибор позволяет измерить частоту и спектр этих колебаний (рис. 6).

Ускоритель MLS имеет два режима работы: standard user mode и low-alpha mode [9]. В первом режиме длительность пучка слабо зависит от количества частиц в нем. При работе MLS в режиме low-alpha mode пучок может иметь длительность несколько пикосекунд и сильную токовую зависимость. В этом режиме мы провели сравнительные измерения стрик-камеры и диссектора (рис. 7).

Длина пучка с током 0.3 мА, при котором возможна надежная работа стрик-камеры, менялась с помощью напряжения на ускоряющем резона-

торе MLS. К сожалению, получить длительность единичного сгустка короче 15 пс не удалось. Систематическое превышение данных диссектора по сравнению со стрик-камерой можно объяснить как погрешностью в калибровке приборов, так и нестабильностью запуска схем управления диссектором. Тем не менее, измеренные длительности сгустка совпадают с хорошей точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе электронно-оптического преобразователя ПИФ-01 создан диссектор нового поколения с временным разрешением в единицы пикосекунд. В экспериментах на ускорителе MLS диссектор нового поколения продемонстрировал все достоинства своего предшественника ЛИ-602

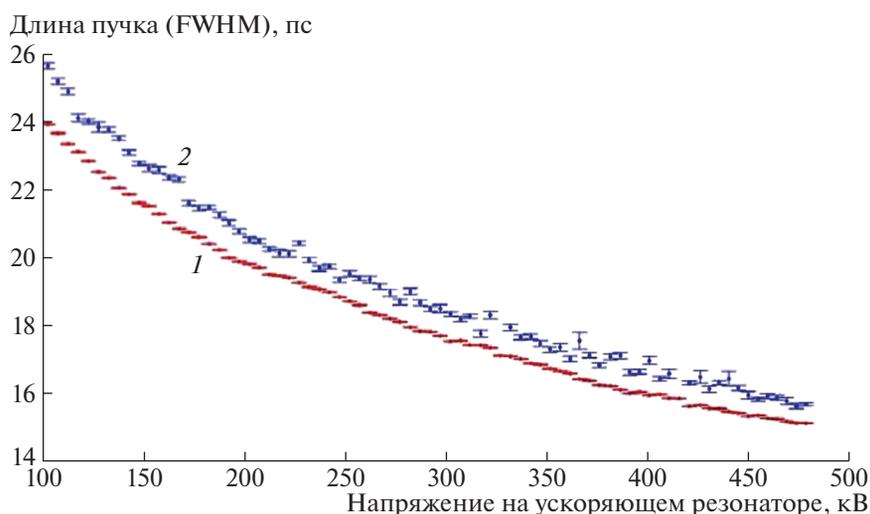


Рис. 7. Сравнение данных по измерению длины пучка при помощи стрик-камеры (1) и диссектора (2).

наряду со значительно улучшенным временным разрешением. Прибор планируется к использованию на установках ИЯФ СО РАН: лазере на свободных электронах, накопителе-охладителе и электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М.

Авторы благодарят всех сотрудников отдела фотоэлектроники ИОФ РАН, принимавших непосредственное участие в разработке и изготовлении электронно-вакуумной части диссектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.М., Искольдский А.М., Нестерихин Ю.Е. Электронно-оптическая фотосъемка в физическом эксперименте. М.: Наука, 1978.
2. Lozovoi V.I., Vorobiev N.S., Malov M.N., Prokhorenko E.A., Schelev M.Ya. // Proc. the 22-nd ICHSPP. USA, Santa Fe: SPIE, 1996. V. 2869. P. 179. doi 10.1117/12/273451
3. Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Шелев М.Я., Шашков Е.В. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 72. doi 10.7868/S0032816216030289
4. Degtyareva V.P., Kulikov Yu.V., Monastyrski M.A., Platonov V.N., Postovalov V.E., Prokhorov A.M., Ulasyuk V.N., Ushakov V.K., Schelev M.Ya. // Proc. SPIE 0491. 16-th Intl. Congress on High Speed Photography and Photonics. 1 February 1985. doi 10.1117/12.967917
5. Zinin E.I. // Nucl. Instrum. and Methods. Phys. Res. 1983. doi.org/10.1016/0167-5087(83)91165-1
6. Агеева Н.В., Иванова С.Р., Комельков А.С., Левина Г.П., Макушина В.А., Михальков Ю.М., Скабалланович Т.А. // Автометрия. 2016. Т. 52. № 3. С. 100
7. 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., Шелев М.Я. // Автометрия. 2016. Т. 52. № 3. С. 108.
8. Feikes J., Von Hartrott M., Ries M., Schmid P., Wüstefeld G., Hoehl A., Klein R., Müller R., Ulm G. // Phys. Rev. STAccel.Beams. 2011. V. 14. P. 030705. doi 10.1103/PhysRevSTAB.14.030705
9. Ries M. PhD thesis. 2014. Humboldt-Universität zu Berlin, Germany. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/051/46051957.pdf