

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАМЕР, РАБОТАЮЩИХ В ДИАПАЗОНЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНА И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

© 2020 г. Г. Г. Фельдман<sup>а</sup>, В. Б. Лебедев<sup>а,\*</sup>, А. А. Синийчук<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ВНИИ оптико-физических измерений  
Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, 46

\*e-mail: Lebedev.bifo@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 14.03.2020 г.

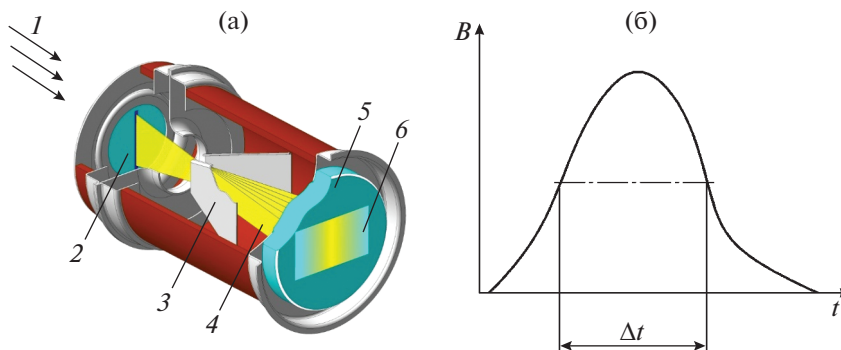
Описана откачиваемая вакуумная установка, содержащая электронную пушку с регулируемым высоковольтным источником напряжения, сменные металлические мишени, фланцы, к которым присоединяется исследуемый объект. Установка разработана специально для измерения пространственных и временных характеристик скоростных электронно-оптических камер, работающих в диапазоне мягкого рентгена. Она может использоваться для исследований и измерений при проектировании фотоприемных устройств мягкого рентгеновского диапазона и их основных частей: например м.к.п.-детекторов, изображающих устройств, твердотельных линейных и матричных фотоприемников, фотоэмиттеров, работающих в вакууме, и пр.

DOI: 10.31857/S0032816220040242

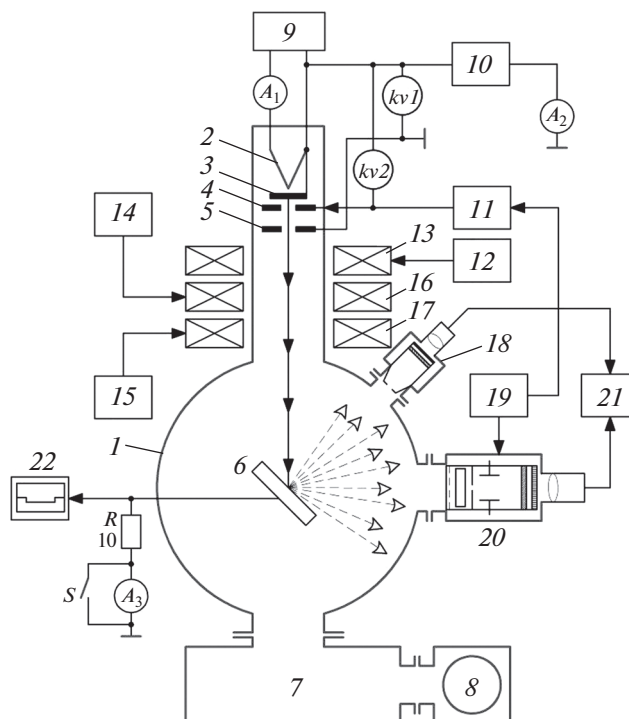
### ВВЕДЕНИЕ

Скоростные электронно-оптические камеры (э.о.к.) [1–3] предназначены для измерения пространственно-временных характеристик оптических импульсов. В этих приборах в качестве первичного приемника используется электронно-оптический преобразователь (э.о.п.) с разверткой изображения, который является частью камеры. Принцип его работы поясняет рис. 1.

Измеряемый оптический импульс  $I$  (рис. 1а), попадая на щелевой фотокатод, возбуждает поток фотоэлектронов  $4$ , который ускоряется в сторону люминесцентного экрана  $5$  и фокусируется на нем. При подаче на отклоняющую систему  $3$  синхронного с оптическим импульсом линейно нарастающего напряжения электронный луч разворачивается по поверхности люминесцентного экрана и вызывает свечение, яркость которого зависит от



**Рис. 1.** Принцип работы э.о.п.: а – времяанализируемый э.о.п. ( $I$  – входной оптический импульс; 2 – щелевой фотокатод; 3 – отклоняющая система; 4 – электронный луч; 5 – люминесцентный экран; 6 – временная развертка изображения оптического импульса); б – зависимость яркости экрана  $B$  от времени  $t$  ( $\Delta t$  – длительность оптического импульса на полувысоте).



**Рис. 2.** Схема установки. 1 – вакуумная камера; 2 – подогреватель катода; 3 – катод; 4 – модулятор; 5 – анод; 6 – мишень; 7 – турбомолекулярный насос; 8 – форвакуумный насос; 9 – источник питания подогревателя катода; 10 – регулируемый (0–50 кВ) источник питания катода 3; 11 – блок управления модулятором 4; 12 – источник питания фокусирующей катушки 13; 14, 15 – источники питания отклоняющих катушек 16 и 17; 18 – наблюдательный канал; 19 – генератор импульсов запуска блока управления модулятором (11); 20 – исследуемый объект (э.о.к.) или измерительный прибор; 21 – компьютер; 22 – осциллограф контроля импульсного тока мишени;  $A_1$  – амперметр для контроля тока подогревателя катода 2;  $A_2$  – миллиамперметр для контроля постоянного тока катода 3;  $A_3$  – миллиамперметр для контроля постоянного тока мишени 6;  $S$  – тумблер;  $R$  – измерительный резистор;  $kv1$  – киловольтметр контроля напряжения на катоде пушки;  $kv2$  – киловольтметр контроля напряжения между катодом и модулятором.

интенсивности оптического импульса в каждый момент времени развертки (рис. 1б).

Сечение луча имеет прямоугольную форму, что, в отличие от луча осциллографа, позволяет иметь две координаты – временную и пространственную. Пространственная координата дает информацию о распределении интенсивности оптического импульса вдоль щели.

Изображение развертки импульса на экране э.о.п. считывается матричным фотоприемником, вводится в компьютер для обработки и сохранения. Обычно э.о.к. включает в себя входную оптическую систему, э.о.п., электронные блоки питания и управления, систему считывания.

Спектральный диапазон чувствительности э.о.к. определяется типом фотокатода э.о.п. Фотокатоды разных типов позволяют перекрыть оптический диапазон от 200 нм до ~2 мкм. Для измерения технических характеристик э.о.к. в оптическом диапазоне обычно используют ламповые, светодиодные или лазерные источники подсветки, линзы и другие оптические элементы, спектральные приборы и пр.

Для измерения параметров скоростных э.о.к., подобных [4–7], работающих в диапазоне вакуумного ультрафиолета (у.ф.) и мягкого рентгеновского излучения, нами разработана откачиваемая вакуумная установка с источником рентгеновского излучения.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки представлена на рис. 2. Вакуумная камера 1 откачивается насосами 7 и 8 до  $\sim 10^{-3}$  Па. В ней установлена электронная пушка, образованная катодом 3, модулятором 4 и анодом 5. Пушка снабжена магнитной фокусирующей катушкой 13 и парой магнитных отклоняющих катушек 16 и 17, позволяющих сформировать в центре заземленной мишени 6 электронное пятно диаметром около 3 мм. Блок управления 11 модулятором 4 позволяет использовать пушку как в режиме постоянного, так и импульсного тока прямоугольной формы. Амплитуду и длительность импульсного тока мишени можно контролировать с помощью осциллографа 22. Вакуумная камера 1 снабжена фланцами, к которым присоединяются

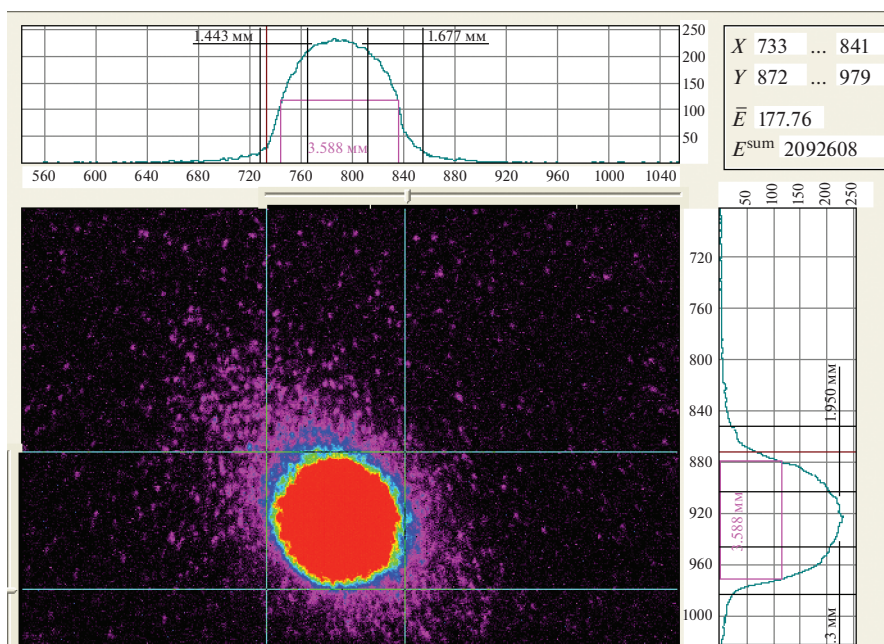


Рис. 3. Рентгеновое изображение электронного пятна на мишени. Диаметр пятна 3.6 мм. Сверху и справа показан профиль интенсивности излучения  $E$  по двум координатам.

наблюдательный канал 18, э.о.к. 20, а также датчики контроля вакуума (на схеме не показаны).

В наблюдательном канале 18 установлен планарный усилитель яркости с микроканальной пластиной (м.к.п.). Перед м.к.п. расположена камера-обскура, строящая на м.к.п. рентгеновое изображение электронного пятна на мишени б. Отверстие обскуры закрыто фильтром из тонкой Ве-фольги, защищающим м.к.п. от электронов, упруго отраженных от мишени. М.к.п. обладает

высокой чувствительностью к мягкому рентгеновскому излучению и может усиливать ток до  $\sim 10^3$  раз и более. Изображение на выходе усилителя яркости записывается п.з.с.-камерой (п.з.с. — приборы с зарядовой связью). Это позволяет визуализировать изображение электронного пятна и контролировать его диаметр и положение на мишени (рис. 3). Материал мишени — медь. Возможно использование других материалов.

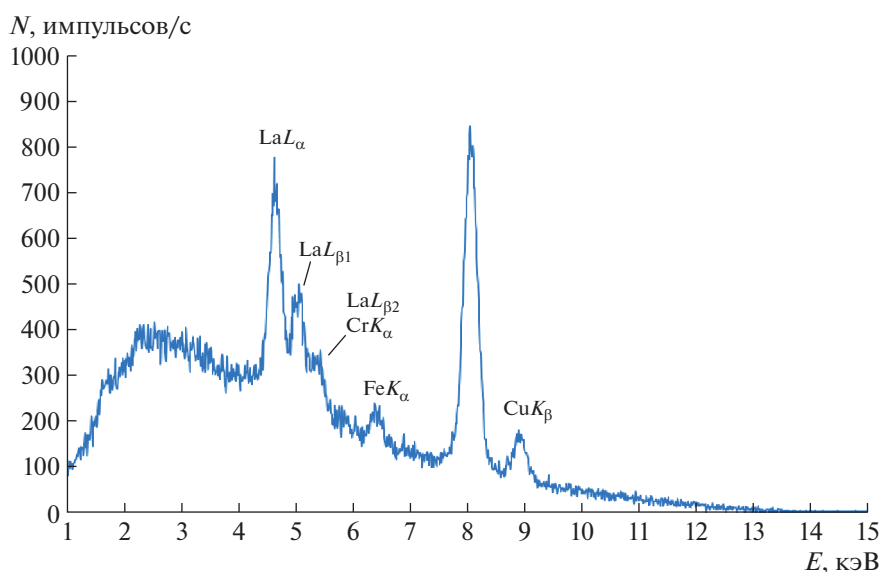


Рис. 4. Спектр излучения мишени при ускоряющем напряжении 13.8 кВ, экспозиция — 300 с.

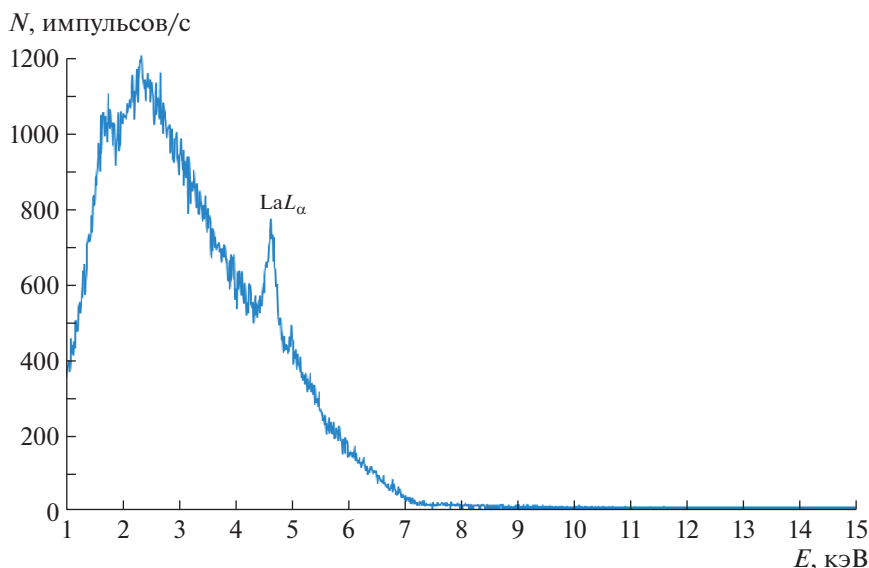


Рис. 5. Спектр излучения мишени при ускоряющем напряжении 7.1 кВ, экспозиция – 300 с.

### СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ МИШЕНИ

Спектры рентгеновского излучения были измерены при ускоряющем напряжении 13.8 и 7.1 кВ, ток  $\sim 2$  мкА. В качестве мишени использовали медную шайбу с водяным охлаждением. Мишень облучали электронным пучком диаметром  $\sim 5$  мм. Угол падения электронного пучка на мишень –  $45^\circ$ , угол отбора рентгеновского излучения –  $45^\circ$ . Детектор рентгеновского излучения – полупроводниковый компании Amptek (XR-100CR) с охлаждением элементом Пельтье. Энергетическое разрешение на линии Mn 190 эВ. Толщина бериллиевого окна 25 мкм. На входном окне детектора установлен коллиматор  $\varnothing 1$  и толщиной 1 мм из медной пластины. Энергетический диапазон регистрации данных детекторов составляет 1–30 кэВ.

Питание и управление детектирующим блоком осуществлялось с помощью аналого-цифрового преобразователя сигналов “Колибри” компании “Грин Стар” (Москва), который имеет в своем составе цифровой сигнальный процессор, высоковольтный и низковольтный источники питания, усилитель и интерфейсный модуль. Подключение через последовательный порт RS-232 используется для передачи результатов измерений во внешний компьютер для дальнейшей обработки. Регистрация данных и последующая расшифровка полученных спектров выполнялись с помощью программы PXRf компании “Амтертек”.

Результаты измерений представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4 видны характеристические линии меди ( $K_\alpha$  и  $K_\beta$ ) от мишени, так как энергии возбуждения этих линий (8.048 и 8.905 кэВ) значи-

тельно ниже приложенного потенциала (13.8 кВ). Наличие пиков железа, хрома и лантана связано с возбуждением элементов конструкции установки. Уменьшение приложенного потенциала приводит к частичному “исчезновению” спектра из-за нехватки энергии, что хорошо видно на рис. 5.

Установка позволяет использовать внешний источник излучения для измерения характеристик э.о.к., например, в ультрафиолетовом диапазоне. Для этого наблюдательный канал 18 (рис. 2) удаляют, а фланец установки закрывают вакуумно-плотным окном из материала, пропускающего ультрафиолетовое излучение. На место рентгеновской мишени помещают зеркало, отражающее оптическое излучение на фотокатод э.о.п.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СКОРОСТНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ Э.О.К.

К основным характеристикам э.о.к. относятся: спектральный диапазон, пространственное разрешение, предельное временное разрешение, длительность кадра (для режима кадровой съемки), коэффициент линейной развертки и его неоднородность.

С помощью описанной установки были измерены основные характеристики э.о.к. K010X [4] (рис. 6) с э.о.п. ПВ-204ХМ [7] (рис. 7).

Э.о.к. K010X предназначена для работы в диапазоне мягкого рентгена. На входе э.о.п. установлен стандартный вакуумный фланец, с помощью которого он соединяется с вакуумной камерой и откачивается вместе с ней до давления не хуже  $10^{-3}$  Па. Конструкция э.о.п. ПВ-204ХМ позволяет уста-



Рис. 6. Внешний вид э.о.к. K010X.

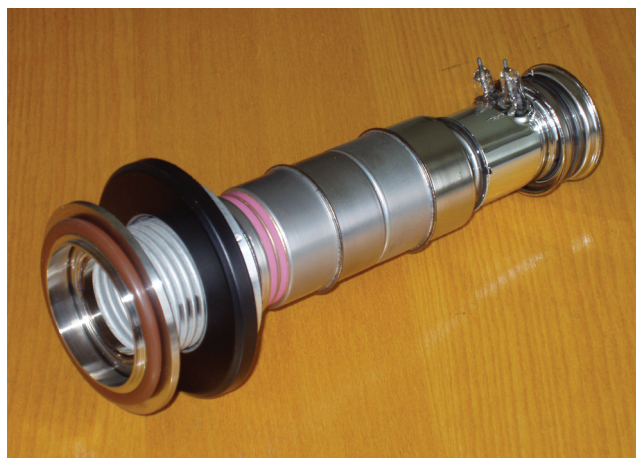


Рис. 7. Внешний вид рентгеновского э.о.п. ПВ-204ХМ с открытым входом.

навливать сменные фотокатоды, работающие на просвет. В качестве фоточувствительных материалов используют CsI или Au, нанесенные на подложку из парилена толщиной 100 нм или бериллиевую фольгу толщиной 5–10 мкм.

Расстояние от мишени установки до фотокаатода э.о.п. составляет 350 мм. Это при диаметре источника рентгеновского излучения 3.6 мм обеспечивает достаточную однородность пространственной облученности фотокатодов.

Пространственное разрешение э.о.к. в однокадровом режиме и в режиме линейной развертки измеряют с помощью двух тест-объектов, устанавливаемых практически вплотную к фотокатоду. Один из них – кадровый (аналог стандартной миры ГОИ № 4) с пространственным разрешением от 6 до 25 пар линий/мм, другой – щелевой, имеющий 4 ранга с пространственным разрешением 5, 10, 15 и 20 пар линий/мм. Тест-объекты изготовлены из медной фольги с вытравленными

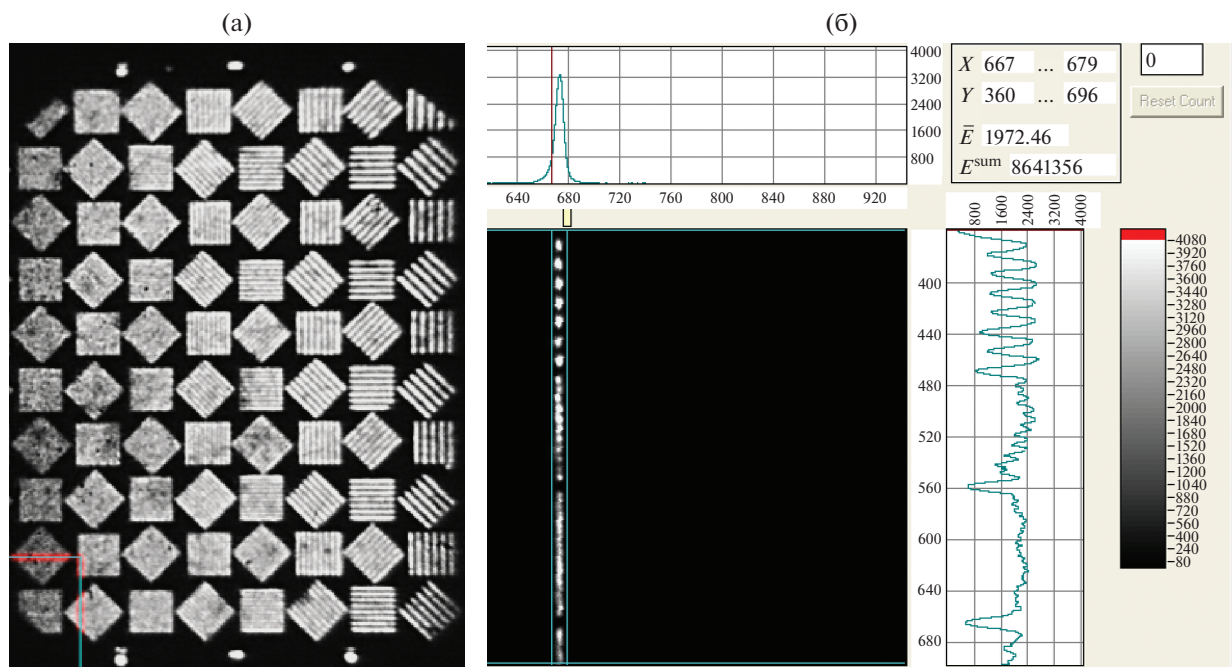
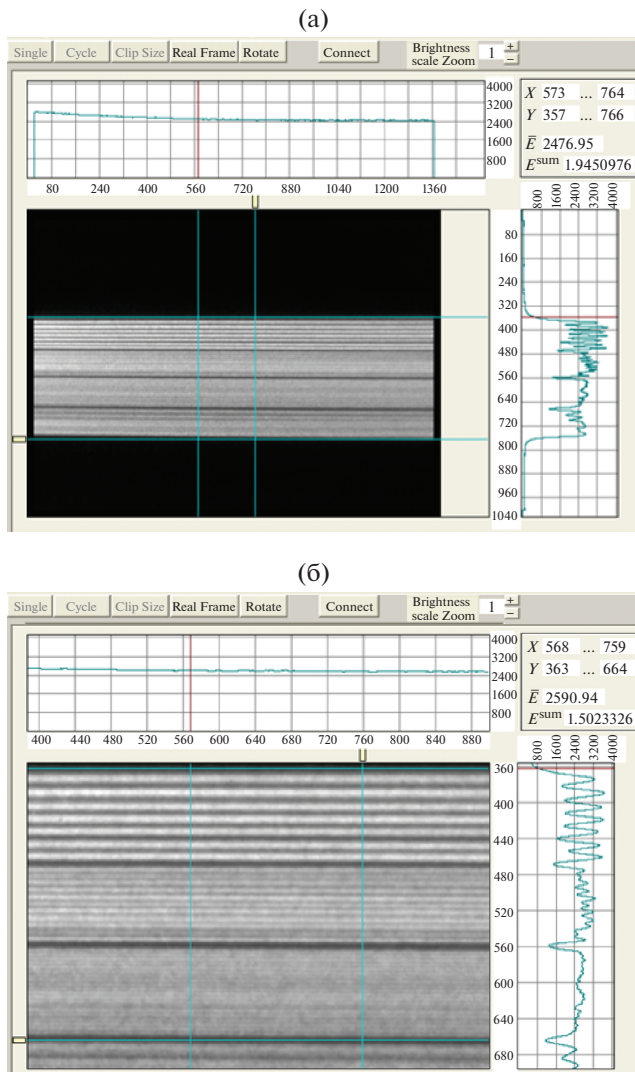


Рис. 8. Изображения: а – кадрового тест-объекта (CsI-фотокаатод на бериллиевой фольге, длительность кадра 655 мкс, пространственное разрешение в центре составляет 12.5 пар линий/мм); б – щелевой тест-объект (CsI-фотокаатод на парилене, длительность кадра 215 мкс, разрешаются три ранга с пространственной частотой 5, 10 и 15 пар линий/мм).

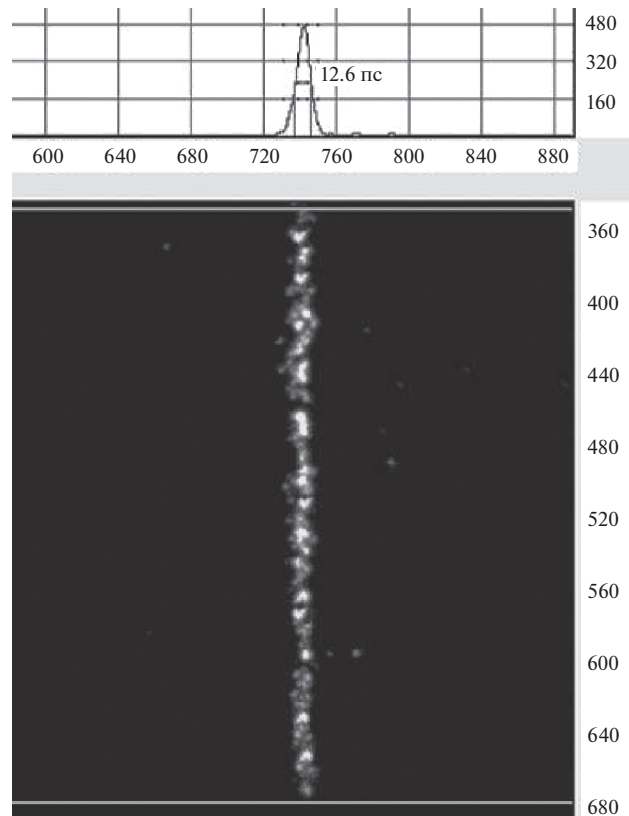


**Рис. 9.** Изображение развертки шелевого тест-объекта (CsI-фотокатод на парилене, длительность развертки 200 мкс): **а** – полное изображение, **б** – фрагмент развертки (уверенно разрешаются первые 2 ранга тест-объекта с пространственным разрешением 5 и 10 пар линий/мм и на пределе 15 пар линий/мм).

штрихами. На рис. 8 и 9 показаны изображения этих тест-объектов, записанные э.о.к.

Изображения, полученные с помощью э.о.к., записывались п.з.с.-камерой, входящей в ее состав, и передавались в компьютер для обработки и архивирования (рис. 8 и 9).

При определении предельного временного разрешения (временная аппаратная функция) на фланец наблюдательного канала было установлено вакуумноплотное окно из  $MgF_2$ , коротковолновая граница пропускания которого  $\sim 110$  нм. Подсветка фотокатода э.о.п. осуществлялась у.ф.-лазером. Длительность импульса 500 фс ( $\lambda = 248$  нм). На рис. 10 показана временная аппаратная функция



**Рис. 10.** Отклик э.о.к. K010X на 500-фс импульс у.ф.-лазера ( $\lambda = 248$  нм).

электронно-оптической камеры в ультрафиолетовом диапазоне. Полуширина аппаратной функции составила 12.6 пс, что соответствует данным работы [7].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная выше установка может быть использована не только для измерения характеристик скоростных рентгеновских э.о.к., но и для исследований и измерений при проектировании приборов ультрафиолетового диапазона, мягкого рентгеновского диапазона и их основных частей: например м.к.п.-детекторов, изображающих устройств, твердотельных линейных и матричных фотоприемников, фотоэмиттеров, работающих в вакууме, и пр.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.А. Болотокова за помощь в измерениях рентгеновских спектров излучения мишени под действием электронного луча.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена с использованием оборудования Центра высокоточных измерительных технологий в

области фотоники (срр.vniiofi.ru), созданного на базе ВНИИ оптико-физических измерений и финансово поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 075-11-2019-076 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. С. 332–396.
2. Ivanov V.S., Zolotarevsky Y.M., Krutikov V.N., Lebedev V.B., Feldman G.G. // 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics – Proc. of SPIE. 2007. V. 6279. 627908. <https://doi.org/10.1117/12.725059>
3. Cone K.V., Baldis H.A., Dunn J., May M.J., Purvis M.A., Schneider M.B., Scott H.A. // Proceedings of the 19th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics. Monterey, California, May. 2012.
4. <https://www.bifocompany.com/rus/p-cam-k010x.php.html>
5. Рентгеновский ЭОП ПВ-204ХМ. <https://bifocompany.com/rus/p-tub-pv204x.php.htm>
6. Hamamatsu C4575-03 X-ray streak camera. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/C4575-03/index.html>
7. Lebedev V.B., Feldman G.G., Myasnikov A.F., Chernyshev N.V., Shubski I.I., Liu Jingru, Wang Lijun, Zang Yongsheng, Zhao Xueqin, Zheng Guoxin, Xiao Weiwei // Proceedings of SPIE. Bellingham, WA. 2007. V. 6279. 62790K. <https://doi.org/10.1117/12.725098>