

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ВИДЕОДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ В ПЯТНЕ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ АРСА

И. А. Елисеев, А. А. Городнов, И. В. Жуков, Д. П. Николаев, С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров

Введение

При проведении работ по исследованию радиационной стойкости микросхем на малогабаритном ускорителе АРСА [1] одной из важных характеристик ускорителя является равномерность пятна тормозного излучения (ТИ). Распределение дозы в пятне ТИ можно исследовать с помощью нескольких традиционных методов [2]. Один из них основан на применении термолюминесцентных детекторов на основе стекла ИС-7. Однако для ускорителей АРСА, в котором диаметр пятна составляет всего 10 мм, сравнительно большие размеры детекторов (диаметр 8 мм, толщина 1 мм) не позволяют оценить вид распределения дозы ТИ в пятне с достаточной точностью.

Ранее для определения пространственного распределения дозы в пятне ТИ использовались серебродержащие рентгеночувствительные материалы, требующие последующей обработки в проявляющих и фиксирующих растворах в условиях фотолаборатории. В настоящее время для этой цели намного проще использовать сцинтиллирующие экраны и цифровые видеорегистраторы, на которых можно моментально получать изображения, пригодные для обработки. В данной работе применяется разработанный в ИЯРФ интеллектуальный визуальный датчик (ИВД) [3] представляющий собой устройство, объединяющее оптический сенсор и процессор обработки сигналов, управляемое с удаленного компьютера с помощью Ethernet-соединения. Благодаря написанному специально для него программному обеспечению [4, 5], а также благодаря возможности полностью контролировать настройки сенсора, ИВД становится привлекательным инструментом для решения задач, требующих оптической регистрации процессов и явлений, обработки результатов измерений и экспресс-анализа.

Целью данной работы является создание современной системы мгновенной регистрации распределения дозы в пучке ТИ для ускорительных установок различной мощности излучения с короткой длительностью импульса (около 100 нсек).

Постановка эксперимента

Схема экспериментального стенда, на котором проводилось исследование пространственного рас-

пределения дозы тормозного излучения ускорителя АРСА, приведена на рис. 1.

Стенд содержит ускоритель 1 АРСА с отпаянной рентгеновской трубкой 2 прострельного типа. Окно трубки состоит из танталовой мишени (толщина 50 мкм) и мембраны из титана толщиной также 50 мкм. Для поглощения электронов, проходящих сквозь мишень и мембрану, на окне может устанавливаться алюминиевый фильтр 3. Вплотную к фильтру 3 расположен перископ, состоящий из флюоресцирующего экрана-конвертера 4, корпуса 5 и зеркала 6. Корпус 5 представляет собой два отрезка (колена) алюминиевой трубы, соединенных перпендикулярно друг другу. Общая длина колен перископа – 1300 мм. При регистрации изображений дозовых пятен была отчетливо видна кромка трубы, на краю которой закреплен экран-конвертер, поэтому внутренний диаметр трубы (45 мм) служил в качестве контрольного размера для определения оптического масштаба переноса изображения с конвертера на приемный CMOS-сенсор ИВД.

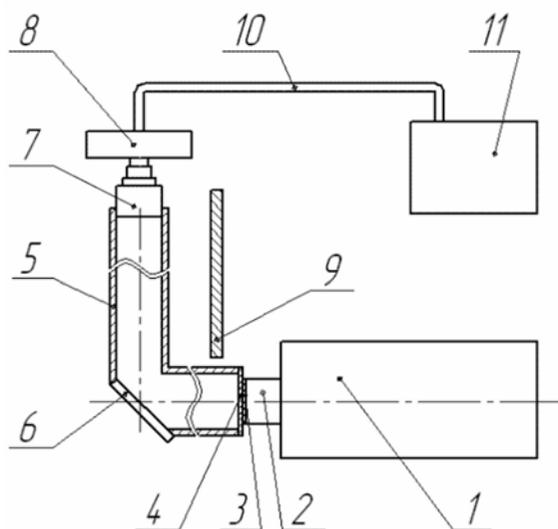


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для определения пространственного распределения дозы ТИ ускорителя АРСА: 1 – ускоритель АРСА; 2 – рентгеновская трубка ТКН-1000; 3 – алюминиевый фильтр (толщина 2 мм); 4 – экран-конвертер; 5 – корпус перископа; 6 – зеркало; 7 – фото-объектив; 8 – интеллектуальный визуальный датчик (ИВД); 9 – свинцовый защитный экран; 10 – кабель связи; 11 – компьютер

На другом конце перископа закреплены фотообъектив 7 и ИВД 8. Перископ необходим для вынесения регистратора (ИВД) из прямого пучка проникающего излучения ускорителя, которое может вывести ИВД из строя. Для защиты ИВД от рассеянного излучения, приводящего к появлению помех на регистрируемых изображениях в форме ярких точек, случайным образом рассеянных по площади кадра, служит свинцовый экран 9. Датчик ИВД через кабель связи 10 подключен к сетевому порту компьютера 11.

Работа стенда заключается в следующем. При срабатывании ускорителя 1 происходит генерация тормозного излучения с мишени трубки 2. ТИ попадает на флуоресцирующий экран 4, который служит конвертером (преобразователем) рентгеновского излучения в видимое изображение. Полученное на экране 4 видимое изображение при помощи перископа передается на фотообъектив 7, который формирует изображение на CMOS-сенсоре датчика 8. При старте прикладной программы в ИВД задается экспозиция 1/10 секунды, частота кадров 10 кадров/сек, при этом имеется возможность зафиксировать вспышку сцинтиллятора, независимо от длительности импульса рентгеновского излучения. ИВД, непрерывно анализируя последовательные кадры видеопотока, автоматически обнаруживает возникновение пятна и передает зарегистрированный кадр через кабель связи на компьютер 10, где он

сохраняется в виде файла изображения. Получаемый кадр имеет размерность 752×480 пикселей при прогрессивной развертке. Алгоритм обнаружения вспышки [4] основан на пороговом анализе освещенности кадра с учетом постоянных шумов матрицы и оптического тракта. Поскольку все регистры сенсора находятся под контролем программиста, это позволяет отключить все авторегулировки и быть уверенным, что любое изменение получаемой картинке связано непосредственно с наблюдаемым объектом.

При создании системы оптической регистрации требуется получить ряд характеристических зависимостей для подтверждения достоверности получаемого изображения, а также калибровки такой системы как измерительного прибора.

В нашем случае требуется знать характеристическую кривую для двух оптических устройств – используемого в ИВД видеосенсора и сцинтиллятора, предназначенного для преобразования тормозного излучения в световое. Для получения характеристической кривой сенсора производилась съемка ступенчатого фотографического клина Kodak с известной последовательностью значений оптических плотностей (21 ступень от 0.05 до 3.05) (рис. 2).

В результате измерений получился практически линейный график зависимости значения пикселей (рис. 3) от интенсивности падающего света.



Рис. 2. Фотографический клин Kodak

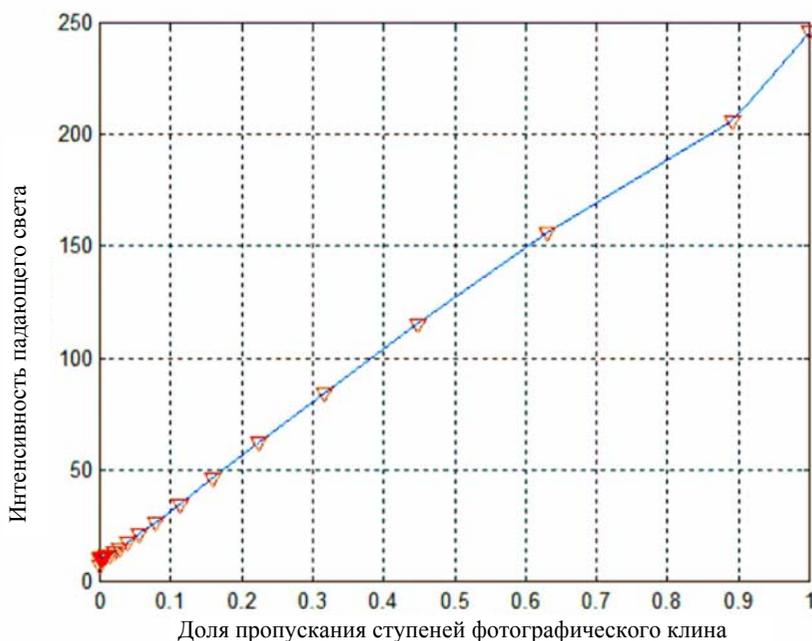


Рис. 3. Зависимость зарегистрированной сенсором интенсивности падающего света от доли пропускания ступеней фотографического клина

Для определения зависимости яркости свечения конвертера, регистрируемой ИВД, от дозы ТИ на конвертере одновременно с регистрацией (при помощи ИВД) светящегося пятна на конвертере проводились замеры доз ТИ на его поверхности. С этой целью на конвертер устанавливался стандартный детектор на основе стекла ИС-7. При срабатывании ускорителя АРСА в рентгеновской трубке происходила генерация ТИ, которое через алюминиевый фильтр 2 (см. рис. 4) и пластину 3 из органического стекла поступало на конвертер 5, вызывая его свечение. При этом доза ТИ измерялась детектором 4, установленном по центру конвертера со стороны трубки, а изображение светящегося конвертера через перископ 6 поступало в датчик ИВД согласно схеме, показанной на рис. 1.

Для определения искомой зависимости величин яркости от дозы ТИ требовалось изменять дозу на конвертере в достаточно широких пределах, что осуществлялось путем изменения расстояния конвертера от окна трубки. Конвертер был жестко закреплен на перископе, поэтому длина оптической оси при этом не менялась. Параметры фотообъектива (zoom, диафрагма) также были жестко зафиксированы и поэтому не служили источником дополнительной погрешности при измерениях. Максимальная доза на конвертере (около 200 рентген) обеспечивалась при установке конвертера вплотную к пластине 3, а минимальная доза (около 50 рентген), соответствующая наименее яркому изображению дозового пятна, получалась при удалении конвертера от пластины 3 на максимальное расстояние $L = 25$ мм. Расстояние изменялось от 0 до 25 мм с шагом 2.5 мм; при каждом его значении замеры яркости и дозы проводились четыре раза.

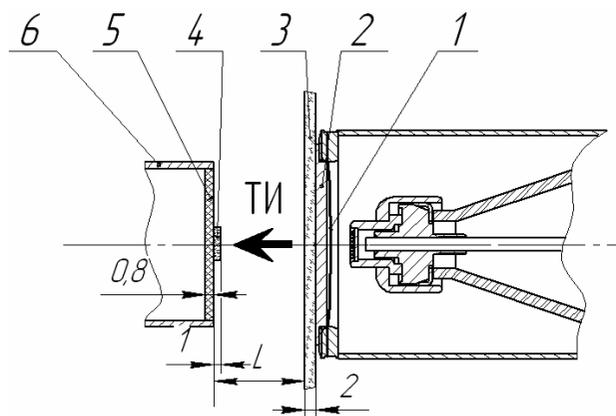


Рис. 4. Схема проведения эксперимента по определению зависимости величин яркости, регистрируемых ИВД, от дозы тормозного излучения на конвертере: 1 – мишень; 2 – алюминиевый фильтр; 3 – пластина из органического стекла; 4 – детектор; 5 – экран-конвертер ILFORD; 6 – перископ

В результате экспериментов была получена серия снимков свечения конвертера с разной экспозицией. Один из таких снимков приведен на рис. 5.

Полученные таким образом экспериментальные значения яркостей и доз ТИ были обработаны по методу наименьших квадратов. Аппроксимация производилась с помощью прямой и параболы, которые затем сравнивались друг с другом. График зависимости величин яркости, регистрируемых ИВД, от дозы ТИ на конвертере приведен на рис. 6. На полученном графике прямая и парабола практически совпадают, из чего можно сделать заключение, что зависимость яркости от дозы линейна. Поэтому на снимках пятен тормозного излучения величина яркости, регистрируемая ИВД, пропорциональна дозе ТИ, а графики распределения яркости по выбранным сечениям вдоль поверхности конвертера в относительных единицах (например, в процентах от максимального значения) будут являться графиками распределения дозы тормозного излучения.

На рис. 7 приведена типичная фотография дозового пятна на окне рентгеновской трубки ТКН-1000 № 4.02.07, установленной на ускорителе АРСА № 7 на напряжение 1 МВ. Фотография получена на стенде, схема которого приведена на рис. 1. Светлые точки (рис. 7), рассеянные по полю изображения, являются следствием прямого воздействия рассеянных гамма-квантов на сенсор ИВД.

На рис. 8 приведен график распределения дозы излучения вдоль диаметральной линии внутри центрального участка пятна диаметром 10 мм.

Из графика видно, что доза ТИ на краях области диаметром 10 мм снижается от ее максимального значения в центре пятна не более, чем на 28 %, т. е. на поверхности окна трубки выполняется требование ОСТ 11 073.013-2008 по равномерности дозы ТИ.

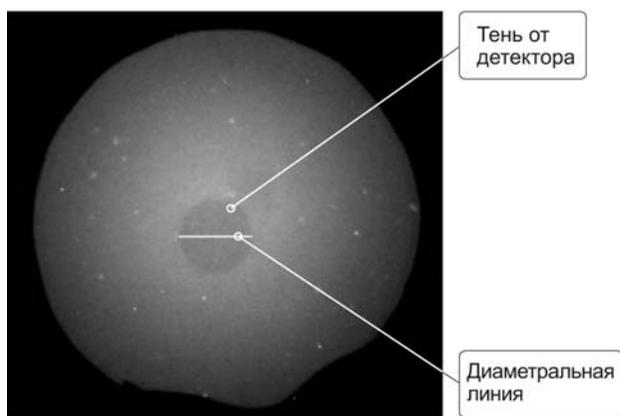


Рис. 5. Снимок светящегося конвертера с закрепленным детектором

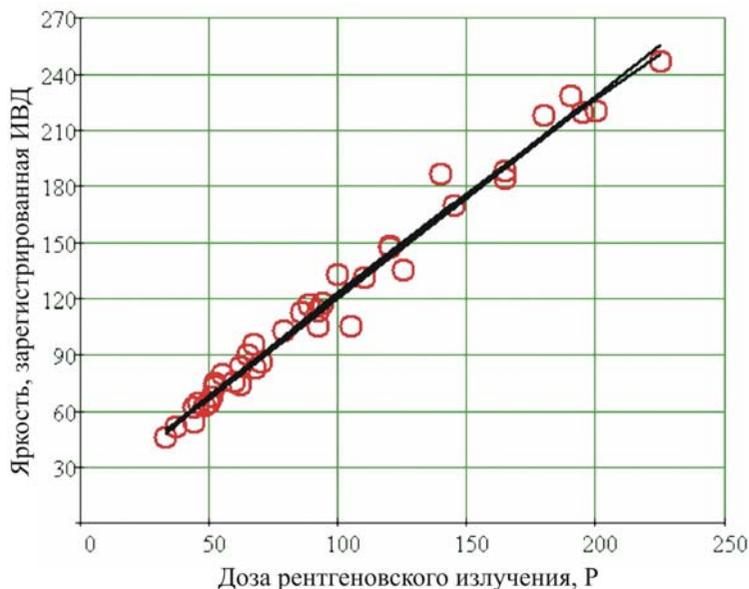


Рис. 6. График зависимости величин яркости, регистрируемых ИВД, от дозы тормозного излучения на конвертере

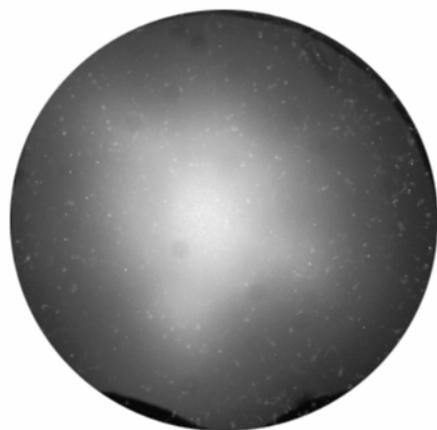


Рис. 7. Типичная фотография пятен тормозного излучения

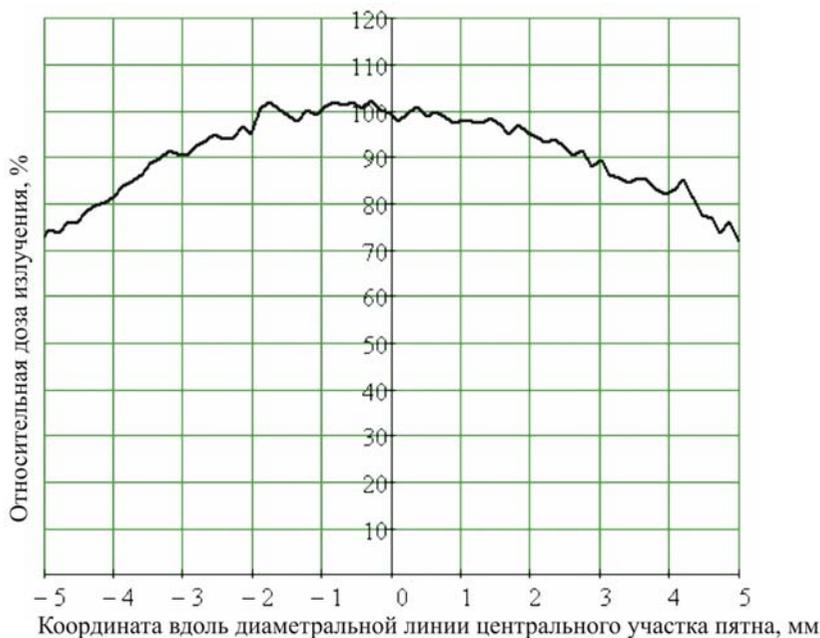


Рис. 4. График распределения дозы тормозного излучения вдоль диаметральной линии внутри центрального участка пятна диаметром 10 мм

Результаты работы

1. Изготовлен экспериментальный стенд для оперативной оценки пространственного распределения дозы тормозного излучения вблизи окон рентгеновских трубок ускорителей АРСА.

Использование сменных объективов Tokina, Helios-44, Юпитер-11 в составе ИВД позволяет получать качественные изображения дозового пятна с масштабом до 18 пикс/мм на расстоянии 1.3 м. В описываемой серии экспериментов масштаб составил 6 пикс/мм.

2. Зависимость величин яркости свечения конвертера, регистрируемых ИВД, от дозы тормозного излучения на конвертере практически линейна; это означает, что графики распределения яркости свечения конвертера совпадают по форме с графиками распределения дозы ТИ.

3. Установлено, что распределение дозы тормозного излучения на окне отпаянной рентгеновской трубки ТКН-1000 № 4.02.07, которая установлена на ускорителе АРСА № 7 на напряжение 1 МВ, удовлетворяет требованию ОСТ 11 073.013-2008 по равномерности дозы ТИ. Доза ТИ на краях области диа-

метром 10 мм снижается от ее максимального значения в центре пятна не более чем на 28 %.

4. В ходе проведенной серии экспериментов проверена адекватность ИВД условиям работы на ускорителе АРСА (выявлены большой запас по оптической чувствительности, слабая зависимость от радиационного фона в помещении и т. д.), что показывает достижимость автоматического режима регистрации на основе применения ИВД.

5. Экспериментальная оценка пространственного распределения дозы тормозного излучения малогабаритного ускорителя АРСА с помощью интеллектуального визуального датчика ИВД показала, что датчик ИВД пригоден для этой цели и может успешно применяться для создания устройства регистрации распределения дозы, необходимого для контроля параметров рентгеновских трубок ускорителей АРСА, разборных вакуумных камер и других ускорительных трубок.

Литература

1. Small-Size Pulse ARSA Accelerator for Radiation Research. Ilyash S. L., Kalinovskaya N. I., Gon-

charova V. F., Korolev V. N., Pukhov S. P., Morenko S. A., Avilov E. A., Yuriev A. L. // Proceeding of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies (Varna, Bulgaria, 1–6 June 2003). – 2003. P.591–594.

2. Метод дозиметрии ИКС. М., Атомиздат, 1977. С. 222. Авт. Бочвар И. А., Гимадова Т. И. и др.

3. Жуков И. В., Ершков А. А., и др. Разработка лабораторного образца интеллектуального визуального датчика. Доклад на VI-й научно-технической конференции «Молодежь в науке», 30 октября – 1 ноября 2007 г., г. Саров. Стр. 53.

4. Жуков И. В., Городнов А. А., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008615152, «Программа автоматической видеорегистрации импульсных событий», 24.10.2008.

5. Жуков И. В. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008615153, «Программа управления и контроля интеллектуального визуального датчика», 24.10.2008.