

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 53.087

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ РЕГИСТРАТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА

© 2012 г. В. Р. Грошев, В. Ф. Казанин, А. В. Оттмар, М. Г. Федотов, А. С. Цыганов

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

E-mail: aottmar@gmail.com

Поступила в редакцию 30.05.2011 г.

После доработки 29.07.2011 г.

Описан цифровой регистратор свечения люминесцентного экрана, разработанный для использования в установках Института ядерной физики СО РАН. Рассмотрены как общие аспекты реализации устройства, так и возможные варианты и особенности создания устройств такого типа на различной элементной базе. Проведен анализ факторов, влияющих на выбор типа светочувствительного датчика изображений – элемента, непосредственно определяющего оптические характеристики регистратора. Приведены результаты практического использования данного устройства для измерения параметров пучка в индукционном ускорителе ЛИУ-2 разработки ИЯФ СО РАН.

ВВЕДЕНИЕ

Визуализация изображений, получаемых при падении электронного пучка или рентгеновского излучения на люминесцентный экран, имеет важное значение в системах диагностики пучков современных ускорительных установок.

Примером системы, использующей люминесцентный экран, является пучковый датчик. Он успешно работает в составе линейного радиочастотного ускорителя на инжекционном комплексе Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [1–3]. Принцип работы пучкового датчика основан на сканировании электронным пучком низкой энергии (20–100 кэВ) электромагнитного поля интенсивного релятивистского пучка. Пробный пучок инжектируется в камеру перпендикулярно исследуемому пучку с некоторым смещением от оси. После взаимодействия с исследуемым пучком пробный пучок попадает на люминесцентный экран детектирующей системы.

Люминесцентный экран, чувствительный к рентгеновскому излучению, используется для измерения поперечного размера электронного пучка на мишени линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2 разработки ИЯФ СО РАН [4]. В результате взаимодействия электронного пучка с энергией 2 МэВ, током 2 кА и длительностью 200 нс с танталовой мишенью толщиной 0.5 мм образуется тормозное излучение, которое проходит через свинцовый коллиматор с круглой диафрагмой и падает на люминесцентный экран.

В рассмотренных выше системах сигнал, несущий информацию о положении и размере пучка, появляется на люминесцентном экране в виде оптического изображения, которое необходимо

зарегистрировать и преобразовать в удобный вид. Наиболее универсальным способом регистрации свечения люминесцентного экрана является использование цифрового регистратора изображений с последующей передачей данных в персональный компьютер (ПК) для обработки.

Поскольку свечение люминофора – это быстропротекающий динамический процесс, требуется обеспечить синхронизацию процесса регистрации с работой ускорителя, а также осуществлять удаленное управление режимом работы регистратора. На рынке представлено большое количество регистраторов изображений, в том числе для научных и промышленных приложений, однако часть из них либо не имеют внешней синхронизации запуска, либо обладают нелинейной зависимостью выходного сигнала от уровня освещенности регистрируемого объекта. Регистраторы с избыточной функциональностью, как правило, имеют очень высокую стоимость. Таким образом, разумно разработать специализированное устройство, удовлетворяющее вышеперечисленным требованиям.

ВЫБОР СПОСОБА РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА

Прежде чем сформулировать требования, которым должен удовлетворять светочувствительный датчик изображения (с.ч.д.и.), рассмотрим основные этапы регистрации изображения.

1. Взаимодействие пучка заряженных частиц или рентгеновского излучения с люминофором.
2. Высвечивание люминофора и преобразование этого света в заряд с.ч.д.и.

Сравнение характеристик с.ч.д.и.

Параметры	С.ч.д.и. на основе п.з.с.	С.ч.д.и. на основе к.м.о.п.		
	SONY ICX-084/ICX-424	APTINA MT9V032	CYPRESS STAR1000	CYPRESS LUPA300
Размер пиксела, мкм	7.4 × 7.4	6.0 × 6.0	15 × 15	9.9 × 9.9
Разрешение	659 × 494	752 × 480	1024 × 1024	640 × 480
Чувствительность (550 нм), В/(лк · с)	—	4.8	—	17
Быстродействие, кадров/с	30	60	11	250
Радиационная стойкость, крад	—	—	250	—
Динамический диапазон, дБ	—	55	71	61
Темновой шум, мВ/с	—	—	30	300
Затвор	Кадровый	Кадровый	Строчный	Кадровый

3. Прием и сохранение изображения в электронике регистратора.

Светочувствительные датчики изображений бывают двух типов: п.з.с. и к.м.о.п. В последних, в отличие от первых, накопленный заряд не передается на общий выходной усилитель, а преобразуется в напряжение с помощью входящего в состав каждой ячейки усилителя, сигнал с усилителя коммутируется транзисторами на вход АЦП. По способу организации считывания заряда с.ч.д.и. на основе п.з.с. делятся на полнокадровые (full-frame ccd), с переносом кадра (frame-transfer ccd) и со строчно-кадровой организацией (interline ccd). Первые два типа имеют наиболее простое строение и максимально эффективно используют площадь кристалла для накопления света, однако при этом требуется внешний оптический затвор для управления временем экспозиции. Создание оптического затвора является сложной технической задачей, поэтому применение таких датчиков не оправданно для разрабатываемого устройства. Структура с.ч.д.и. на основе п.з.с. со строчно-кадровой организацией содержит защищенные от света вертикальные области, по которым выполняется передача заряда из области накопления в горизонтальный сдвиговый регистр, после чего — на выход. Эти области располагаются в непосредственной близости от области накопления. В такой структуре площадь светочувствительной области меньше, однако при этом обеспечивается перенос заряда в транспортную область за один цикл, или, другими словами, эта структура выполняет функцию электронного затвора.

Наличие в каждой ячейке с.ч.д.и. на основе к.м.о.п. усилителя и коммутационных транзисторов обеспечивает чтение только необходимой области кадра, а значит, уменьшает объем передаваемой информации и время считывания. Наиболее простая ячейка с.ч.д.и. на основе к.м.о.п. состоит из фотодиода и трех транзисторов для

сброса, передачи и коммутации сигнала на выход датчика. Датчики изображений с такой структурой имеют строчный электронный затвор (rolling shutter), сброс и считывание накопленного заряда выполняются построчно, поэтому экспозиция последней строки кадра выполняется позже первой на время чтения кадра. Кадровый электронный затвор (global shutter), при котором экспозиция всех ячеек происходит одновременно, имеют с.ч.д.и. с ячейками, содержащими 5–6 транзисторов. Основным достоинством с.ч.д.и. на основе к.м.о.п. является высокая степень интеграции всех необходимых функциональных блоков в одном корпусе. В таблице приведены для сравнения удовлетворяющие вышеперечисленным условиям с.ч.д.и. на основе к.м.о.п. и п.з.с. Более подробное сравнение преимуществ каждой технологии можно найти в работе [5].

Представленные в таблице с.ч.д.и. существенно различаются по цене и характеристикам. Нами был выбран датчик MT9V032 как наиболее доступный и простой в использовании. Датчик изображения LUPA300 отличается наибольшим быстродействием, а STAR1000 — высокой радиационной стойкостью и большим динамическим диапазоном, что может оказаться полезным для ряда приложений. В будущем эти с.ч.д.и. также планируется использовать для регистратора. Дальнейшее описание касается только MT9V032, если не оговорено особо.

Поскольку цифровой регистратор предполагается использовать в качестве измерительного прибора, не требуется ни сложной обработки, ни адаптации изображения для человеческого глаза. Более того, фильтрация и нелинейное преобразование приведут к искажению информации, поэтому задача регистратора — сохранять полученные из с.ч.д.и. данные и передавать в их ПК. В связи с этим от традиционно применяемого в регистраторах цифрового сигнального процессо-

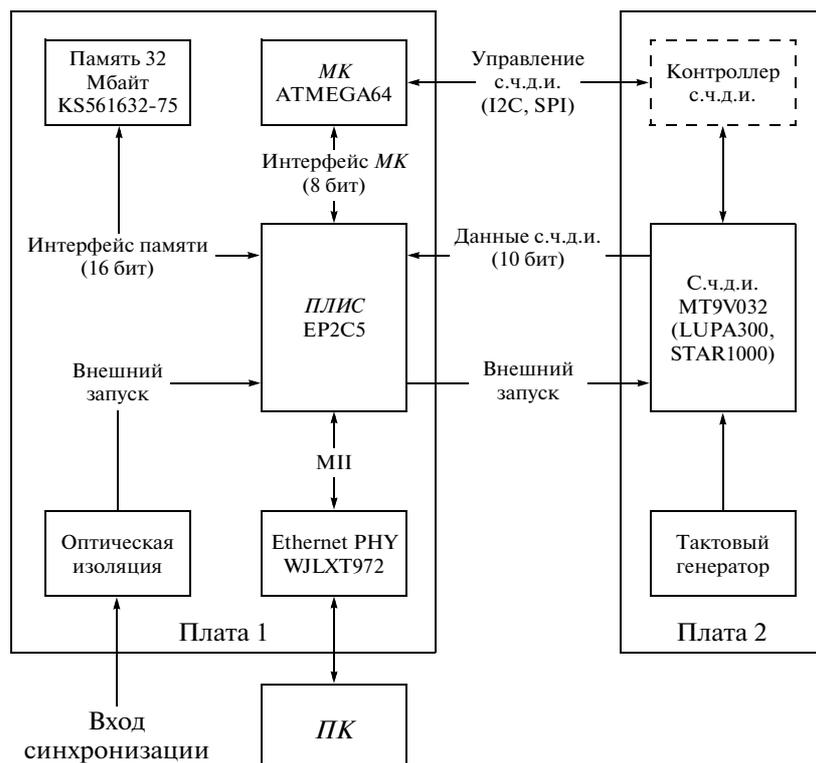


Рис. 1. Схема расположения элементов регистратора на печатных платах. В состав с.ч.д.и. может входить контроллер.

ра решено было отказаться в пользу микроконтроллера (*МК*) и программируемой логической интегральной схемы (*ПЛИС*).

ОПИСАНИЕ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ

Устройство (рис. 1) выполнено на двух печатных платах, которые соединяются между собой гибким кабелем длиной до 30 см. Основные функциональные элементы первой платы: управляющий *МК* Atmel ATMEGA64-16AU, *ПЛИС* Altera EP2C5T144-8N, динамическая память емкостью 32 Мбайт (KS561632E-TC75), сетевой контроллер 100BASE-TX Ethernet PHY (WJLXT972A). Кроме того, на первой плате расположены стабилизаторы напряжения для питания микросхем и оптическая развязка для внешнего запуска. При использовании соответствующего источника питания устройство полностью гальванически изолировано от сети, от *ПК* и от сигнала синхронизации, что особенно важно при эксплуатации камеры в составе ускорительной установки.

На второй плате расположены с.ч.д.и. MT9V032, тактовый генератор и стабилизатор напряжения. Светочувствительный датчик изображения вынесен на вторую плату с целью уменьшения общих габаритов устройства и упрощения механического сопряжения этой платы с оптической системой. Кроме того, в этом случае можно использовать и другие с.ч.д.и., для чего потребуются разработать

только вторую плату, а первая останется без изменений.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ

Микросхема *ПЛИС* содержит набор логических элементов, блоков быстрой двухпортовой памяти, аппаратных умножителей и матрицу соединений. Такая архитектура наиболее удобна для параллельной обработки множества независимых событий, выполнения большого объема простых логических и математических операций, а также для реализации контроллеров скоростных интерфейсов. В данной работе *ПЛИС* выполняет следующие функции: контроллера динамической памяти, Ethernet MAC контроллера, входного буфера для приема данных от с.ч.д.и., выходного буфера для отправки данных в *ПК*, интерфейса связи с *МК*, диспетчера потоков между с.ч.д.и., динамической памятью и *ПК*.

Рассмотрим перечисленные выше функциональные блоки подробнее.

1. Входной буфер необходим для временного хранения данных, получаемых от с.ч.д.и. и передаваемых во внешнюю динамическую память, и позволяет сохранять две строки кадра. Одновременно с заполнением буфера очередными данными идет отправка сохраненной ранее строки во внешнюю динамическую память, что обеспечи-

вает своевременное освобождение буфера для приема следующих строк и сохранение всего кадра во внешней памяти.

2. Выходной буфер также используется для отправки данных в *ПК*. Ethernet MAC контроллер читает из него данные и передает в *ПК*, при заполнении буфера выставляется сигнал “Заполнен”, запрещающий запись новых данных. После освобождения буфера сигнал сбрасывается, и разрешается запись новых данных.

3. Контроллер динамической памяти выполняет все операции по работе с внешней памятью: конфигурацию, регенерацию, открытие/закрытие банка и страницы, запись и чтение данных. Записываются в память данные из входного буфера, а считываются в выходной буфер.

4. Интерфейс связи с *МК* выполняет демультимплексирование и дешифрование адреса из шины *МК* для согласования с внутренней шиной в *ПЛИС*, которая связывает все функциональные блоки.

5. Диспетчер потоков данных управляет передачей данных между контроллером внешней динамической памяти, входным и выходным буферами. В диспетчере потоков также имеются счетчики строк принимаемого и передаваемого кадров, по которым вычисляются адреса во внешней памяти.

6. Ethernet MAC контроллер фильтрует входящие пакеты по MAC и IP адресам, формирует IP заголовки для исходящих пакетов и рассчитывает контрольную сумму CRC. При получении пакета с целевым IP адресом контроллер выставляет флаг “Получен Ethernet пакет”, по которому в *МК* происходит прерывание и выполняется обработка пакета. При наличии данных в выходном буфере они отправляются в *ПК*.

Пользователь работает с камерой с помощью управляющей программы для *ПК*, которая посылает камере команды и принимает от нее ответы. Упрощенно процесс взаимодействия управляющей программы и камеры выглядит следующим образом:

- управляющая программа отправляет заданный пользователем режим работы камеры;
- управляющая программа отправляет камере запрос на съемку нового кадра и ожидает от камеры ответ;
- получив запрос, камера ждет завершения экспозиции кадра от с.ч.д.и., интервал времени от получения запроса до получения кадра помимо времени экспозиции включает в себя время ожидания сигнала внешнего запуска;
- камера сохраняет кадр в своей памяти и отправляет в *ПК* ответ о завершении приема кадра;
- получив ответ, управляющая программа отправляет камере запрос на отправку кадра и принимает кадр; если часть строк кадра была по-

теряна, то при необходимости управляющая программа может повторить запрос этих строк.

Для передачи изображения в *ПЛИС* используется десять линий для данных, сигналы горизонтальной и вертикальной синхронизации и тактовый сигнал. Данные упаковываются по три 10-битных пиксела в два 16-битных слова и сохраняются во входном буфере. По завершении приема строки изображения она записывается во внешнюю память, начиная с адреса, вычисленного диспетчером потоков из номера кадра и строки. Входной буфер при этом освобождается для приема новых строк. Этот процесс повторяется циклически, и весь кадр сохраняется во внешней памяти. Параллельно с получением и сохранением одного кадра устройство может выполнять чтение другого кадра из внешней памяти для отправки в *ПК*.

Сетевой адрес камеры устанавливается через RS232-интерфейс, для этого может быть использована любая программа-терминал (например, Nurg Terminal). Обмен данными с *ПК* ведется по протоколу UDP из-за его простоты и небольших системных требований. Протокол UDP не обеспечивает целостности передаваемой информации, поэтому данные функции должны быть реализованы в устройстве и в управляющей программе.

Формирование заголовков, фильтрация адресов и проверка контрольных сумм, составляющие основной объем операций в обслуживании UDP-протокола, выполняются в *ПЛИС*, что позволяет максимально использовать полосу пропускания сетевого интерфейса. С учетом служебной информации скорость передачи данных достигает 86 Мбит/с, что эквивалентно скорости 22 кадра/с с разрешением 752 × 480 точек. Скорость записи кадров в память устройства достигает 1.5 Гбит/с, что значительно превосходит возможности использованного с.ч.д.и. (260 Мбит/с). Это позволяет использовать с.ч.д.и. с большим разрешением или быстродействием.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе разработки было изготовлено несколько прототипов устройства, на которых было отлажено программное обеспечение, проверена работоспособность и выполнена оптимизация аппаратной части. Последняя версия печатных плат (рис. 2) пригодна для тиражирования, а программное обеспечение имеет необходимую функциональность и стабильность для эксплуатации. К настоящему времени изготовлена первая партия устройств для нужд ИЯФ.

Впервые устройство было применено в ноябре 2010 г. на ускорителе ЛИУ-2 в ИЯФ. Были выполнены измерения поперечного размера электронного пучка на мишени. Рентгеновское излучение, возникающее в результате конверсии электронов на танталовой мишени, попадало на экран из окси-

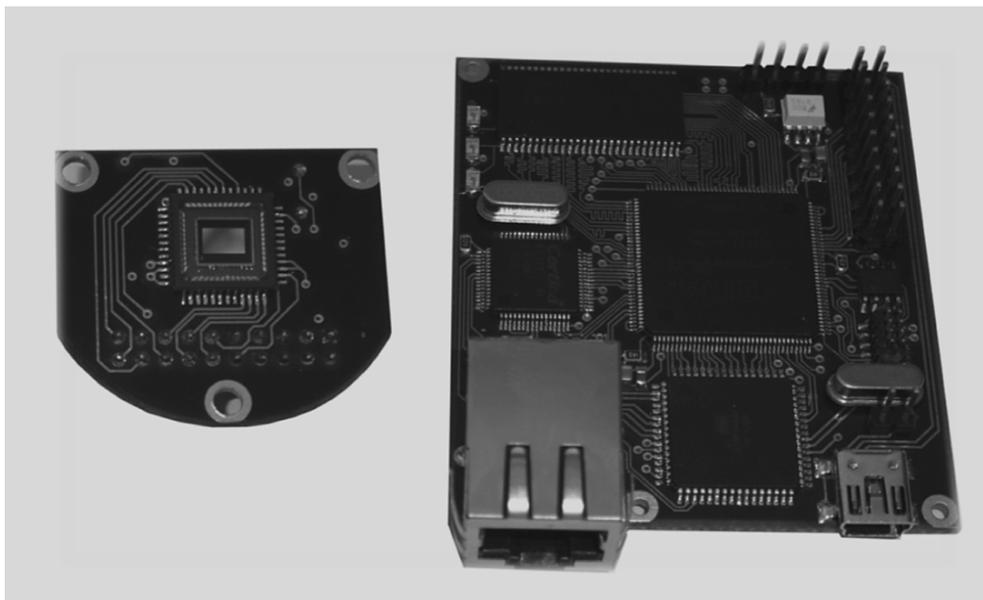


Рис. 2. Внешний вид регистратора.

сульфида гадолиния (Gd_2O_2S-Tb), где при взаимодействии с веществом экрана преобразовывалось в видимый свет. Яркость светящегося изображения на экране была пропорциональна интенсивности рентгеновского пучка. Схема эксперимента по определению размеров пучка показана на рис. 3.

Источник тормозного рентгеновского излучения, размер которого определяется размером электронного пучка на мишени, проецируется на экран посредством танталовой диафрагмы толщиной 1 мм с круглым отверстием диаметром 2 мм. Граница отверстия на экране становится размытой из-за того, что источник фотонов неточечный. Величина размытия пропорциональна поперечному размеру электронного пучка. Методика определения размера пучка основана на аппроксимации границы функцией Ферми:

$$f(x, y) = P_0 + \frac{P_1}{1 + \exp\left(\frac{r - P_2}{P_3}\right)}; \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x - P_4)^2 + (y - P_5)^2} \quad (2)$$

с шестью параметрами. Параметр P_0 – уровень яркости изображения танталовой пластины; P_1 – уровень превышения яркости изображения в области отверстия (вне танталовой пластины) над яркостью изображения танталовой пластины; P_2 – радиус отверстия; P_3 – ширина переходной области отверстие–пластина; P_4 и P_5 – координаты центра отверстия. Важным параметром является ширина переходной области P_3 , определяющая поперечный размер пучка. Соответствие этого параметра действительному размеру пучка определялось путем численного моделирования.

При моделировании использовался круглый пучок однородной интенсивности. В результате моделирования определялась плотность энерговыделения в экране. Аппроксимируя плотность энергии в экране функцией (1), можно получить коэффициент пересчета параметра P_3 аппроксимирующей функции в размер пучка.

Эксперимент показал необходимость радиационной защиты детектора, без которой не удавалось получить качественные снимки. На рис. 4 приведено изображение танталовой диафрагмы, на котором видны края пластины и круглое отверстие.

Аппроксимация яркости изображения области вблизи отверстия дает значение параметра $P_3 = 11.2 \pm 3.3$ пиксела. Один пиксел соответствует ~ 0.06 мм на экране. Коэффициент пересчета параметра P_3 с учетом геометрических размеров приблизительно равен 7. Таким образом, диаметр

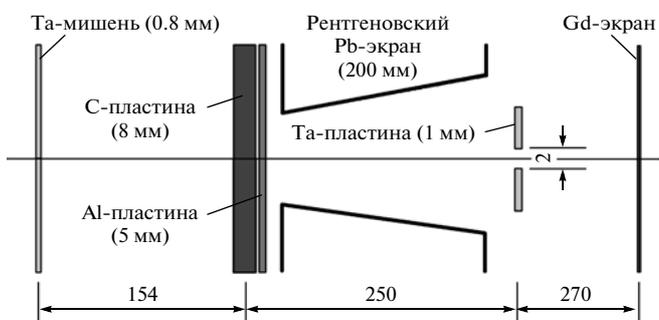


Рис. 3. Схема эксперимента по определению размеров пучка на ЛИУ-2.

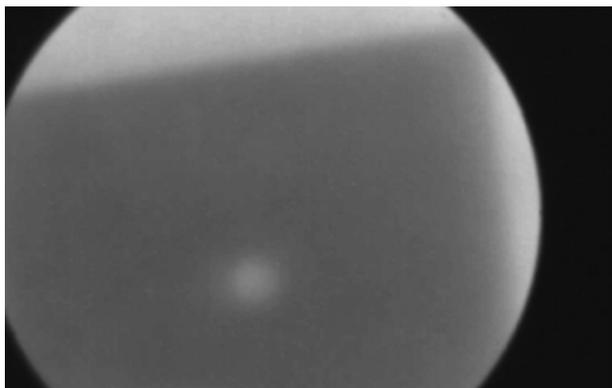


Рис. 4. Изображение танталовой диафрагмы.

пучка в предположении, что сечение пучка — круг с одинаковой интенсивностью, равен 4.9 ± 1.4 мм. Результат согласуется с оценкой, сделанной по размытию ровного края танталовой пластины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение нужно отметить, что, взяв за основу широко распространенные недорогие электронные компоненты, можно изготовить цифровой

регистратор изображений, который будет удовлетворять требованиям экспериментатора. Важным достоинством подобного подхода является возможность модернизации и ремонта устройства, а также его адаптации для широкого круга приложений. При этом в большинстве случаев не потребуются серьезной переделки аппаратной части устройства, а достаточно будет добавить необходимые функции в микропрограмму.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (контракт № 14.740.11.0160) и Рособразования (контракт № П2493).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логачев П.В., Малютин Д.А., Старостенко А.А.* // ПТЭ. 2008. № 1. С. 5.
2. *Logatchov P.V., Bak P.A., Starostenko A.A. et al.* // Proc. 18th IEEE Particle Acceleration Conference. USA, N.Y., 1999. P. 2167.
3. *Pasour J.A., Ngo M.T.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. № 5. P. 3027.
4. *Батраков А.М., Логачев П.В., Павленко А.В. и др.* // Вестник НГУ. 2010. Том 5. Вып. 3. С. 98.
5. Laurin Publishing Co. Inc. CCD vs. CMOS: Maturing Technologies, Maturing Markets // PHOTONICS SPECTRA, August 2005.