

УДК 531.761

Измерение интервала времени с пикосекундным разрешением для системы "лазер — времяпозиционно-чувствительный детектор излучения"

У. Юсупалиев, Н. В. Радомский, С. А. Шутеев, В. А. Коковин, П. У. Юсупалиев
 Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет,
 Москва, Россия
 E-mail: nesu@phys.msu.ru

Для существенного улучшения разрешающей способности системы "лазер — времяпозиционно-чувствительный детектор излучения" выбран оптимальный метод измерения интервала времени и осуществлена практическая реализация измерителя, базирующегося на микросхеме TDC-GPX. Тестовые измерения показали, что такое устройство имеет разрешающую способность ~10 пс при диапазоне измерений до 40 мкс.

PACS: 07.50.-e; 84.30.-r; 84.37.+q

Введение

Существует ряд важных практических задач, для решения которых требуется получать послойное изображение обзораемого пространства. Такими задачами являются: наблюдение объектов в мутных средах (в тумане, под водой); получение изображения онкологических опухолей под кожей человека на ранних стадиях заболевания; разработка перспективных космических систем поиска малых объектов и слежения за ними; создание интеллектуального зрения роботизированных систем.

Система получения послойного изображения обзораемого пространства включает в себя импульсный лазер, ЭОП, ПЗС-матрицу, быстродействующую измерительную электронику и специализированное программное обеспечение для обработки информации с использованием метода стробирования ЭОП. Метод стробирования существенно улучшает соотношение сигнал/шум. Для этой системы основными характеристиками являются длительность стробирования Δt_{sur} и время задержки импульса строга относительно импульса облучения (лазера) $t_d = 2Z/c$, где Z — расстояние от облучателя до объекта, c — скорость света в среде. Меняя величину t_d , можно получить послойное изображение обзораемого пространства. Глубина слоя равна $\Delta Z = (c \times \Delta t_{sur})/2$. Если $\Delta t_{sur} \leq 10$ пс ($\Delta Z \leq 1,5$ мм) и шаг задержки $\Delta t_d \leq 10$ пс, то можно утверждать о получении трехмерного изображения, так как появляется возможность получения пространственного рельефа исследуемого объекта с точностью 1,5 мм.

Идея стробирования ЭОП возникла еще при появлении импульсных лазеров, однако реализовать ее на практике оказалось сложно. Так, в лазерной системе видения [1] величина Δt_{sur} составила ~500 нс, что соответствует глубине слоя ~75 м. По этой проблеме улучшение результатов достигнуто в работах [2, 3]: $\Delta t_{sur} = 500$ пс ($\Delta Z = 7,5$ см) равно длительности импульса излучения лазера с шагом изменения 100 пс (слой через 3 см).

Попытка дальнейшего уменьшения величины Δt_{sur} наталкивается на трудности принципиального характера: необходимо учитывать время задержки электрического сигнала в элементах ЭОП. При диаметре микроканальной пластины (МКП) 25 мм время распространения электрического сигнала с одного конца до другого составляет 83 пс, что сравнимо с длительностью строга. Это обстоятельство также отразится на процессе стробирования ЭОП: функция стробирования промежутка фотокатод — МКП при подаче высоковольтного импульса (амплитудой 400—1000 В) полностью восстановится через 83 пс после начала стробирования. Для получения слоя глубиной $\Delta Z = 1,5$ мм требуется величина $\Delta t_{sur} = 10$ пс. В настоящее время генерация высоковольтного импульса с такими характеристиками представляется сложной задачей вследствие существования паразитной индуктивности, емкости и сопротивления элементов предполагаемого генератора.

Для преодоления указанных недостатков авторами работ [4—6] предложен другой принцип получения послойного изображения обзораемого пространства в оптическом

диапазоне спектра. Такой принцип реализован на основе нового метода одновременного измерения координат (x , y) и момента поступления $t_d = 2Z/c$ отдельных фотонов лазерного импульса, отраженных от элементов поверхности объекта. Одновременное измерение величин x , y и t_d проводится с помощью нового времяпозиционно-чувствительного детектора излучения (ВПЧД) [7], работающего в однофотонном режиме. Эксперимент показал [4, 6], что разрешение момента поступления отдельных фотонов δt_{LSB} макетного образца ВПЧД составило ~ 90 пс для одного импульса. Однако такое разрешение недостаточно для решения вышеуказанных прикладных задач.

Таким образом, возникает необходимость существенного уменьшения величины δt_{LSB} . Поэтому целью данной работы являются анализ и выбор оптимального метода измерения интервала времени (ИВ) с разрешением порядка 10 пс, а также практическая реализация устройства измерения ИВ для системы "лазер—ВПЧД".

Анализ методов измерения интервала времени

Известно несколько принципиально разных методов измерения ИВ. Каждый из них имеет свой предел точности, диапазон измерений, свои достоинства и недостатки с точки зрения практической реализации. При выборе метода измерения необходимо учитывать следующие параметры:

диапазон измерений Δt_{MR} ;

разрешающая способность δt_{LSB} ;

"мертвое" время Δt_{DT} (минимальное время между сигналом "Стоп" и следующим сигналом "Старт");

длительность стартового и стопового импульсов Δt_{Start} и Δt_{Stop} .

Диапазон измерений может меняться от нескольких наносекунд при измерении быстропротекающих процессов (например, при фундаментальных исследованиях в физике высоких энергий) до нескольких миллисекунд (например, при геодезических измерениях).

Величина разрешающей способности δt_{LSB} определяется весом младшего разряда измерителя LSB (Least Significant Bit) и соответствует точности прибора. Величины Δt_{MR} и δt_{LSB} являются взаимозависимыми и определяются разрядностью внутреннего регистра измерителя ИВ. Поэтому при выборе в пользу того или иного метода измерения ИВ в первую очередь необходимо обращать внимание на требования к параметрам Δt_{MR} и δt_{LSB} , а также на тип задач, для которых используется измеритель ИВ. Величина Δt_{DT} — это

минимальный интервал времени, необходимый для обработки информации перед последующим измерением.

Длительность стартового и стопового импульсов (Δt_{Start} и Δt_{Stop}) должна быть как можно меньше и соизмерима с величиной разрешающей способности. Кратко проанализируем некоторые из существующих методов измерения ИВ.

Численно-импульсный метод

Простейшим и самым надежным, а поэтому и самым распространенным способом измерения ИВ является численно-импульсный метод [8, 9]. С помощью генератора формируется непрерывная серия импульсов (СИ) с периодом следования T . Подсчет числа импульсов счетчиком от момента начала до момента окончания измерения ИВ позволяет получить значение измеряемого интервала: $t_{int.time} = n \times T$, где n — число импульсов, зарегистрированное счетчиком.

Современное состояние интегральных схем дает ограничение по разрешающей способности при измерении ИВ этим методом. Например, для достижения разрешения $\delta t_{LSB} = 1$ нс необходима тактовая частота 1 ГГц, а получение величины разрешения в пикосекундном диапазоне требует построения схем на сверхпроводящей электронике. Так, в работе [9] представлен измеритель ИВ с тактовой частотой 33 ГГц и разрешающей способностью 30 пс, созданный на основе численно-импульсного метода с использованием такой электроники, что является дорогим и технически сложным решением.

Метод заряда и разряда конденсатора

Суть этого метода состоит в том, что длительность измеряемого интервала "растягивается" в определенное число раз с помощью "быстрого" заряда и последующего "медленного" разряда конденсатора [10]. Измерение осуществляли в два этапа преобразований. На первом этапе время преобразуется в аналоговую величину (напряжение) — ТАС (Time to Analog Converter), а на втором — аналоговая величина преобразуется в цифровой код с помощью АЦП. Коэффициент растяжения интервала времени вычисляется по формуле $K = (I_1 - I_2)/I_2$ (I_1 — ток заряда, I_2 — ток разряда), причем $I_2 \ll I_1$. "Растянутый" интервал измеряется, как правило, численно-импульсным методом, согласно которому разрешающая способность соответствует величине $\delta t_{LSB} = T_0/(K+1)$.

Быстродействие электронных компонент существенным образом влияет на основные характеристики и ограничивает предельные значения. Так, в работе [11] представлен измеритель ИВ, базирующийся на этом методе с основными параметрами: $\delta t_{LSB} = 200$ пс и $\Delta t_{MR} = 200$ нс.

Нониусный метод

При измерении интервала времени по методу верньерной интерполяции (нониусный метод [10, 12]) используются два опорных генератора с частотами $f_1 = 1/T_1$ и $f_2 = 1/T_2$, причем частоты отличаются несущественно. Сигнал "Старт" запускает первый генератор, а сигнал "Стоп" разрешает работать второму генератору. Быстродействующая схема следит за тем, когда произойдет совпадение фаз обоих генераторов. Подсчитывается число импульсов n на каждом из генераторов до моментов совпадения фаз (n_1 и n_2 , соответственно, для каждого генератора). Эти числа используются для вычисления величины измеряемого интервала времени: $t_{int.time} = |(n_1 - 1)T_1 - (n_2 - 1)T_2|$. Разрешающая способность δt_{LSB} измерения ИВ этим методом равна $|T_1 - T_2|$.

Метод верньерной интерполяции при использовании современной элементной базы может обеспечить точность измерений примерно в 100 пс [10].

Метод цифровых линий задержек

Значительно более высокой точности удастся достичь путем применения метода цифровых линий задержек. Этот принцип измерения ИВ был сформулирован в работе [13], а затем доработан и применен в разработках TDC (Time to Digital Converter) в Европейском центре ядерных исследований (CERN) [14, 15].

Использование внутренней распространяющейся задержки сигнала является основой метода, при этом величина линии задержки соответствует минимальному кванту измерений, т. е. является величиной временного разрешения. Предлагаются различные конфигурации цепочек линий задержек [10]. Обычно это набор триггеров, которые последовательно переключаются по мере распространения стартового импульса. После подачи импульса "Стоп" процесс переключений останавливается, производится считывание состояния триггеров и рассчитывается длительность интервала времени. При современной технологии такие линии

задержек легко реализовывать в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). При использовании такой структуры возникает ряд проблем: сильное влияние температуры и питающего напряжения на значения линий задержек и значения измерений; требуется высокая стабильность задающей серии импульсов; уменьшается диапазон измерений.

Интерполяционный метод

Метод используется в случае, когда требуется высокое разрешение при относительно большом диапазоне измерений. Измеряемый ИВ разбивается на три отрезка. С помощью метода цифровых линий задержек измеряется начальный промежуток — интервал времени (ИВ) (вблизи сигнала "Старт") и конечный (в районе сигнала "Стоп").

А ИВ, соответствующий полным циклам основной серии импульсов между сигналами "Старт" и "Стоп", измеряется численно-импульсным методом. Идеи интерполяционного метода, предложенные в работе [16], затем были доработаны под современные технологии в [10].

Современные КМОП-технологии позволили создать TDC на одном кристалле с интерполятором и цепочкой линий задержек. Такие TDC отличаются высокой разрешающей способностью (до 10 пс), широким диапазоном измерений (сотни микросекунд), слабой температурной зависимостью, невысокой требовательностью к источникам питания и низкой ценой. Для преодоления проблемы, связанной с влиянием температуры, напряжения и частоты на параметры элементов задержки, в схему введен специальный узел, предназначенный для постоянного контроля. Этой цели служит устройство фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которое контролирует отклонение параметров от калиброванных значений.

В TDC используется интерполятор накопленных данных [14, 15], который позволяет уточнить результат измерения ИВ. Например, интерполятор имеет n -разрядное число входов, на которые поступает внешний тактовый сигнал, сдвинутый на величину задержки. Тактовый сигнал поступает на второй вход интерполятора с задержкой t , а на третий вход — с задержкой $2 \times t$, т. е. время поступления сигнала на i -вход равно $(i - 1) \times t$.

Таким образом, на входах интерполятора устанавливаются сдвинутые во времени импульсы тактового сигнала, при появлении

стопового импульса входные данные запоминаются во внутренних регистрах. В результате получаем двоичный код, несущий уточняющую информацию о моменте прихода импульса "Стоп".

В работах [17, 18] представлены различные способы аппаратной реализации измерителей ИВ, базирующихся на микросхемах TDC.

Итак, для решения поставленной задачи анализ существующих методов измерения ИВ позволил сделать выбор в пользу преобразователя TDC-GPX, базирующегося на интерполяционном методе, поскольку при таком подходе можно получить величину разрешающей способности измерителя ИВ ~ 10 пс.

Измеритель интервала времени, созданный на базе TDC-GPX

Разработанный модуль измерителя ИВ (рис. 1) спроектирован в виде одноплатной конструкции, имеющей интерфейс стандарта PCI (Peripheral Component Interconnect). Этот стандарт позволяет подключать периферийные устройства к материнской плате компьютера.

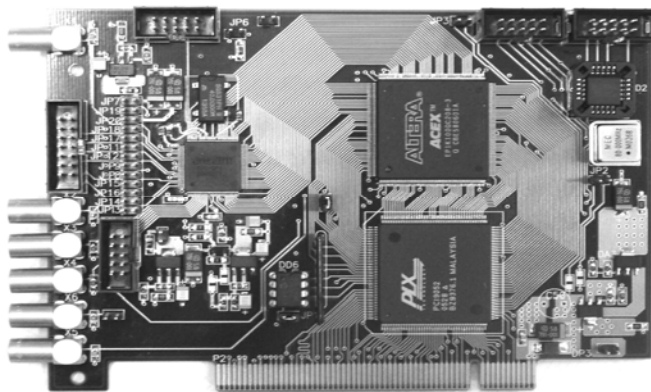


Рис. 1. Модуль измерителя временного интервала

На функциональной схеме (рис. 2) представлены основные узлы модуля. Интерфейс входных сигналов обеспечивает согласование уровней напряжения между входными импульсами и сигналами измерителя. Интегральная микросхема TDC-GPX [19, 20], являясь ядром, осуществляет непосредственно преобразование величины ИВ в цифровой код. Эта микросхема представляет собой восьмиканальный измеритель ИВ, работающий в четырех

режимах, что дает возможность использовать ее для широкого спектра приложений.

Микросхема TDC-GPX имеет удобный интерфейс программирования запуска и установок, однако ее интерфейс не позволяет напрямую соединить преобразователь с компьютером по одному из стандартных каналов. Поэтому для решения этой проблемы в модуле применен драйвер интерфейса PCI-9052. Взаимодействие между отдельными узлами модуля и задание алгоритма работы осуществляются с помощью ПЛИС семейства FPGA EP1K100TC240-1. ПЛИС имеет в своем составе набор управляющих регистров, регистр данных и память типа FIFO. Наличие промежуточного регистра данных обусловлено алгоритмом работы сканирующей системы, когда только в FIFO накапливается необходимая информация. Емкость встроенной памяти FIFO позволяет сохранять свыше 1500 32-битных записей.

Использование ПЛИС позволяет выполнять предварительную аппаратную обработку измеренных координат. Задание режимов работы микросхемы осуществляется с помощью конфигурационной памяти. Поскольку выдвигаются высокие требования к источнику питания, предусмотрен стабилизатор напряжения. Модуль содержит два дифференциальных (LVPECL) и четыре низковольтных (LVTTTL) канала. Каждая группа каналов имеет собственный стартовый вход. Дифференциальные каналы обеспечивают наилучшее разрешение, остальные используются для технологических целей.

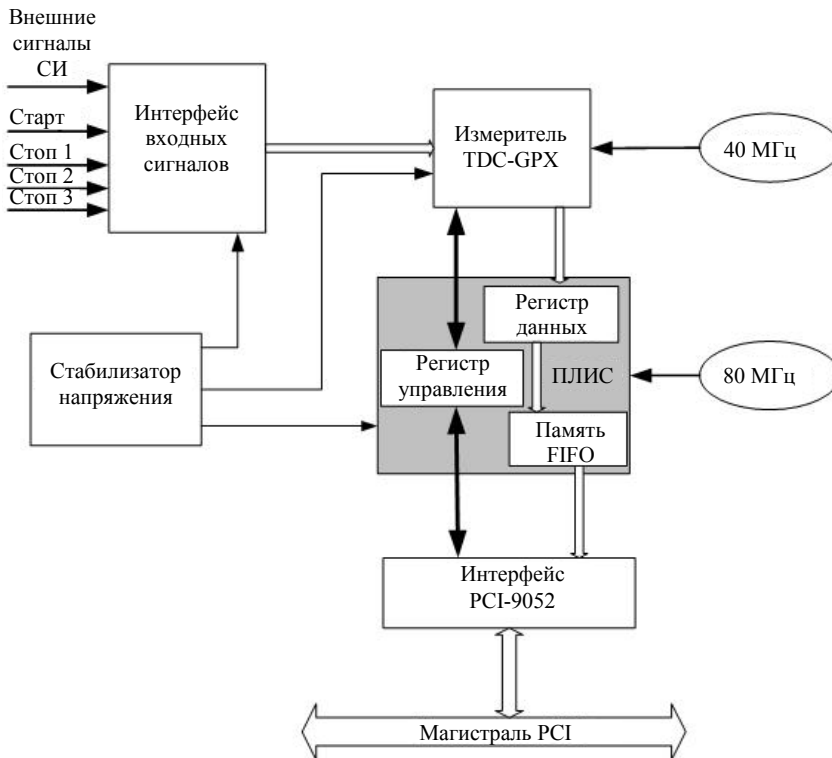


Рис. 2 Функциональная схема измерителя ИВ

Для TDC-GPX существует базовый диапазон измерений. Так, в *M*-режиме $\Delta t_{MR} = 0\text{--}40$ мкс и $\delta t_{LSB} = 10$ пс [19]. Однако для ряда практических применений измерителя ИВ, например в случае измерения расстояния до объекта, удаленного на десятки метров, требуется расширение этого диапазона. В этом случае необходимо вводить в работу дополнительный счетчик, на который возлагается задача измерения ИВ, состоящего из числа полных периодов серии импульсов между сигналами "Старт" и "Стоп". Здесь диапазон измерений расширяется, и его величина зависит от разрядности этого счетчика. Измерение ИВ в расширенном диапазоне (до 200 мс) возможно (при данной методике) без снижения разрешающей способности TDC.

На рис. 3 представлена временная диаграмма процесса измерения и коррекции величины ИВ. Эта методика применяется и в случае расширенного диапазона измерений. Принцип измерений следующий: счетчик CT_1 измеряет интервал времени t_{CT1} от сигнала "Старт" до ближайшего положительного фронта сигнала СИ (серия импульсов с периодом T_{si}). Счетчик CT_2 измеряет ИВ t_{CT2} от сигнала "Стоп" до ближайшего положительного фронта СИ. Основной счетчик подсчитывает число полных периодов синхросерии N между сигналами "Старт"—"Стоп". Непосредственно после измерений запускается счетчик калибровки, который определяет один (T_{KLB1}) и два (T_{KLB2}) периода, соответственно. В

результате окончательная величина ИВ рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{int.time} = T_{si} \times \left[N + \left(\frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{T_{KLB1} - T_{KLB2}} \right) \right]. \quad (1)$$

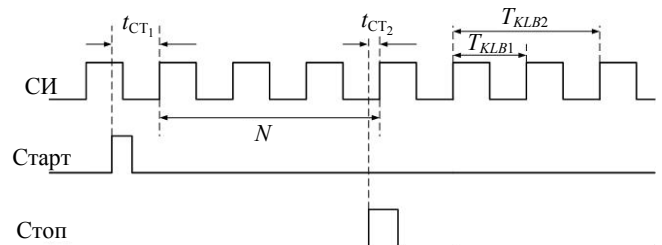


Рис. 3. Временная диаграмма измерения ИВ

На погрешность измерителя ИВ влияют следующие внешние факторы: температура окружающей среды, напряжение питания микросхемы, тактовая частота. Для коррекции окончательного значения $t_{int.time}$ (1) применяется высокостабильный внешний генератор с частотой 40 МГц. В течение двух периодов TDC производит калибровочные измерения. Калибровочные значения вычисляются относительно измеряемого события, чтобы скорректировать измеренную величину. Калибровка может быть двух типов: программная и аппаратная. Методика вычисления калибровочных значений представлена на рис. 4.

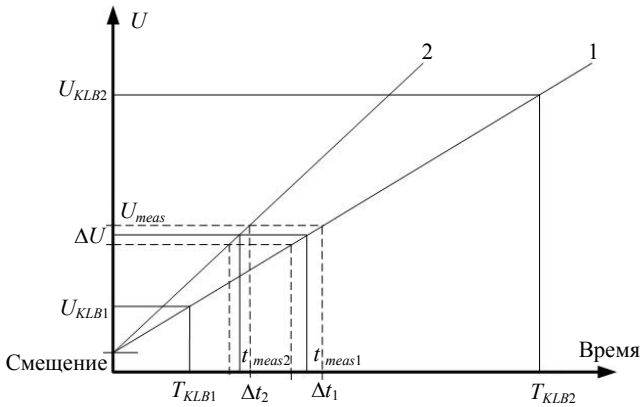


Рис. 4. Графическое представление программной калибровки

Неизвестная величина U_{meas} может быть найдена прямо на измерительной линии 1 (см. рис. 4), полученной при преобразовании величины времени в аналоговое значение напряжения. Эта линия характеризуется градиентом $\frac{T_{KLB2} - T_{KLB1}}{U_{KLB2} - U_{KLB1}}$ и смещением нуля ($2 \cdot U_{KLB1} - U_{KLB2}$). С помощью двух измерений T_{KLB1} и T_{KLB2} , а также указанных характеристик можно вычислить неизвестную величину t_{meas} по формуле

$$t_{meas} = (T_{KLB2} - T_{KLB1}) \times \frac{U_{meas} - (2 \cdot U_{KLB1} - U_{KLB2})}{U_{KLB2} - U_{KLB1}}. \quad (2)$$

Формула (2) получена при условии, что $T_{KLB2}/T_{KLB1} = 2$. Безусловно, реальная характеристика нелинейная и имеет интегральную погрешность, при этом максимальная погрешность не превышает $1 \times \delta t_{LSB}$.

Рассматривая линию 2 на рис. 4, видно, что с увеличением угла наклона измерительной линии (а это значит, что сужается диапазон измерений), снижается погрешность измерений ($\Delta t_1 > \Delta t_2$). Так, для TDC-GPX отклонение в измерениях может составить $(0,5—0,7) \times \delta t_{LSB}$, если $\Delta t_{MR} < 5$ мкс, а если Δt_{MR} возрастает, то и отклонения в измерениях увеличиваются и достигают $1 \times \delta t_{LSB}$ [20].

Для аппаратной калибровки в качестве генератора, задающего тактовую частоту, используется откалиброванный кварцевый резонатор с малым джиттером ($0,01—0,1$ ppm). С его помощью перед выполнением измерений обязательно производится калибровка каналов с помощью тестовых измерений. Полученная величина сохраняется в специальном регистре. Она остается стабильной благодаря постоянному контролю температуры и стабилизации

напряжения питания ядра, которое регулируется с помощью ФАПЧ.

Заключение

В результате проведенной работы был создан модуль (см. рис. 1), проведены его калибровка и тестовые измерения, которые показали, что модуль имеет следующие характеристики:

- δt_{LSB} — 10 пс (70 пс — минимальное время между двумя стоповыми сигналами);
- Δt_{DT} — 5,2 нс (максимальное "мертвое" время);
- Δt_{MR} — от 0 до 40 мкс;
- срабатывание по положительному фронту;
- 40 МГц — поступление событий на канал, 80 МГц — поступление событий на чип;
- два дифференциальных LVPECL входа, упрощающих сопряжение с формирователями импульсов.

Для уменьшения "мертвого" времени обработки измерений можно параллельно подключить несколько TDC, подавая один общий сигнал "Старт" и несколько сигналов "Стоп" (на каждый TDC свой сигнал "Стоп").

Представленный в работе измеритель ИВ будет использован в системе "пикосекундный лазер—ВПЧД" для достижения точности измерения момента поступления отдельных фотонов δt_{LSB} порядка 10 пс.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 05-08-50343-а.

Литература

1. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
2. Busck J., Heiselberg H.// Laser Radar Technology and Application IX: Proc. of SPIE. 5412 (SPIE Bellingham, WA., 2004).
3. Anderson J., Busck J., Heiselberg H.// Ibid. Proc. of SPIE. 5791 (SPIE Bellingham, WA. 2005).
4. Шутеев С. А. Дис. ... на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. — М.: МГУ, 2005.
5. Юсупалиев У., Шутеев С. А., Стрелетов А. Н. и др.// Прикладная физика. 2006. № 6. С. 123.
6. Юсупалиев У., Шутеев С. А., Юсупалиев П. У.// Краткие сообщения по физике. 2008. № 6. С. 21.
7. Стрелетов А. Н., Шутеев С. А., Юсупалиев У. Времпозиционный детектор излучения: Пат. 2217708 РФ от 27.11. 2003 г. Дата начала действия патента 05.02.2002 г.; Заявка № 2002102781/28(003108); Приоритет от 05.02.2002 г.
8. Hewlett-Packard. Application Note 200-3. 1997. P. 6.
9. Kirichenko A., Sarwana S., Mukhanov O. et al.// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2001. V. 11(1). P. 978.
10. Józef Kalisz//Metrologia. 2004. V. 41(1). P. 17.
11. Simpson M. L., Britton C. L., Wintenberg A. L., Young G. R.//

- IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1997. V. 32(2). P. 198.
12. Гурин Е. И.// ПТЭ. 1998. № 4. С. 82—84.
13. *Rahkonen T. E., Kostamovaara J. T.*// IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1993. V. 28(8). P. 887.
14. *Christiansen J.*// Ibid. 1996. V. 31(7). P. 952.
15. *Mota M., Christiansen J.*// Ibid. 1999. V. 34(10). P. 1360.
16. *Nutt R.*// The Review of Scientific Instruments. 1968. V. 39(9). P. 1342.
17. *Denisov S. P., Dzierba A., Heintz R. et al.* 2005. IHEP. Preprint 2005-35.
18. *Antonioli P., Meneghini S.*// 9-th Workshop on Electronics for LHC Experiments 29.09-3.10 003. Amsterdam.
19. TDC-GPX. Datasheet. ACAM. December 2006.
20. The TDC Cookbook RELEASE 2.0. <http://www.acam-usa.com/Content/English/acam.html>.

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2009 г.

Measurement of short time interval for the system "laser-time position sensitive detector of radiation"

U. Yusupaliev, N. V. Radomsky, S. A. Shuteev, V. A. Kokovin, P. U. Yusupaliev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
E-mail: nesu@phys.msu.ru

For substantial improvement of resolution of system "laser-time position sensitive detector of radiation" the optimum method of measurement of a time interval is chosen and practical realisation of the measuring instrument which is based on microcircuit TDC-GPX is carried out. Test measurements have shown that the time interval measuring instrument has resolution 10 ps at a range of measurements to 40 μ s.

PACS: 07.50.-e; 84.30.-r; 84.37.+q