

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 53.088.7+681.2.082

### ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ВРЕМЯЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

© 2011 г. Р. В. Полещук\*, Б. К. Лубсандоржиев\*\*,\*\*

\*Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

\*\*Kepler Center for Astro and Particle Physics, University of Tübingen

Auf der Morgenstelle 14, D-72076, Tübingen, Germany

Поступила в редакцию 11.01.2011 г.

Времяцифровой преобразователь разработан для исследования коррелированных во времени событий с большими временами задержки между событиями. Диапазон измеряемых интервалов времени 276 мкс, ширина канала преобразователя 67.4 нс, интегральная нелинейность  $\leq 1\%$ , дифференциальная нелинейность  $\leq 4\%$ . Преобразователь выполнен в стандарте КАМАК.

Во многих физических экспериментах возникает необходимость измерения интервалов времени длительностью до сотен микросекунд и более. В качестве примера можно привести эксперименты, где планируется использовать так называемые “медленные” сцинтилляционные кристаллы, времена высвечивания которых составляют десятки или даже сотни микросекунд. Это эксперименты по поиску темной материи и двойного безнейтринного  $\beta$ -распада ядер [1–3]. Кроме того, отдельный интерес представляют явления, имеющие место в самих детекторах, например послеимпульсы в фотоэлектронных умножителях (ф.э.у.). Послеимпульсы в ф.э.у. — это импульсы, строго коррелированные с основным импульсом и отстающие от него на время от десятков наносекунд до десятков микросекунд. Основным источником послеимпульсов является как ионизация атомов остаточного газа в вакуумном объеме фотодетекторов, так и поверхностная ионизация атомов и молекул, адсорбированных на поверхностях эмиттеров фотодетекторов [4–8].

Для измерения длительности интервалов времени в ядерно-физических экспериментах в настоящее время широко используются времяцифровые преобразователи (в.ц.п.). Основная масса времяцифровых преобразователей специализирована для измерения малых интервалов времени от десятков пикосекунд до сотен наносекунд. Кроме этого, такие преобразователи не всегда доступны, и их стоимость остается довольно высокой.

Для изучения кинетики свечения “медленных” сцинтилляционных кристаллов и временных распределений послеимпульсов в вакуумных фотоумножителях нами был разработан 12-разрядный в.ц.п. БПВ-15. Одними из требований к

в.ц.п. были простота исполнения и доступность элементной базы.

Времяцифровой преобразователь БПВ-15 предназначен для измерения интервалов времени длительностью до 276 мкс с шириной канала преобразования 67.4 нс. По методу измерения временного интервала БПВ-15 является в.ц.п. прямого счета [9, 10], т.е. в преобразователе сначала формируется интервал времени, длительность которого напрямую равна времени между фронтом и спадом измеряемых импульсов. Этот интервал времени затем оцифровывается с помощью генератора импульсов тактовой частоты.

Преобразователь выполнен на основе микросхем т.т.л.(TTL)/т.т.л.ш. Для корректной работы счетчиков т.т.л.ш. частота импульсов тактового генератора выбрана равной 15 МГц. Функциональная схема БПВ-15 приведена на рис. 1. Преобразователь состоит из следующих блоков: двух преобразователей уровней NIM/TTL, формирователя импульса *ФИ*, тактового генератора *G*, блоков управления, счетчиков и регистров.

После преобразования уровней от NIM в TTL сигналы *Start* и *Stop* поступают в формирователь импульса *ФИ*. Длительность выходного импульса формирователя *ФИ* равна (с определенной точностью) измеряемому интервалу времени. Максимальная длительность измеряемого интервала времени ограничена до значения 276 мкс.

По спаду измеряемого импульса формируется сигнал *Готовность* в блок управления для выработки *LAM*-запроса, выставления его на магистраль КАМАК и записи накопленных данных счетчиков в выходные регистры. С помощью логического элемента *И* измеряемый интервал времени заполняется импульсами тактового генератора. Выходные сигналы элемента *И* считываются

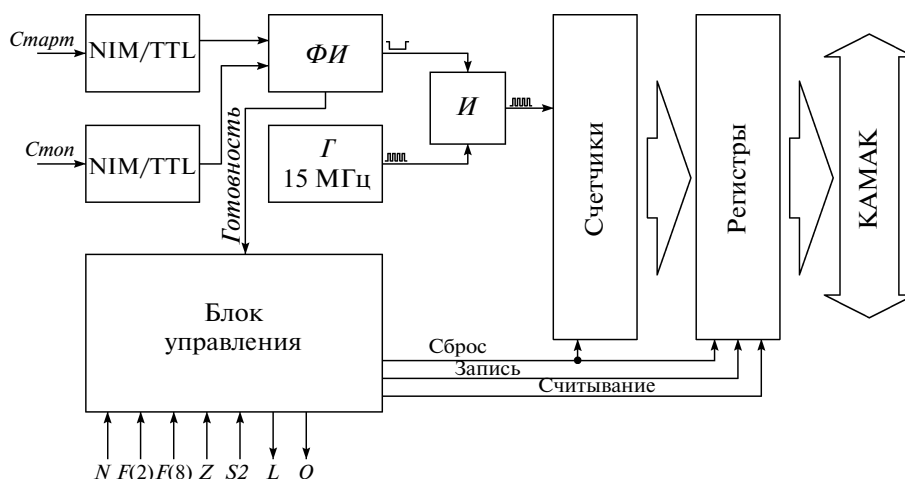


Рис. 1. Функциональная схема времяцифрового преобразователя БПВ-15. NIM/TTL – преобразователи уровня NIM в т.т.л.; ФИ – формирователь импульса; Г – генератор тактовой частоты 15 МГц; И – схема совпадений.

ся счетчиками и через регистры поступают на шину КАМАК.

Принципиальная схема БПВ-15 приведена на рис. 2. Преобразователи уровней NIM/TTL выполнены на транзисторах  $T_1$ – $T_4$ . Формирователь импульса ФИ представляет собой D-триггер  $M_{3-1}$ . Максимальная длительность измеряемого временного интервала определяется длительностью выходного импульса одновибратора  $M_2$ . Генератор выполнен на кварцевом резонаторе 15 МГц и трех инверторах  $M_5$ .

Выходные импульсы логического элемента И ( $M_4$ ) подаются на три последовательно соединенных четырехразрядных двоичных счетчика  $M_7$ – $M_9$ . Состояния этих счетчиков по сигналу Готовность от блока управления через элементы  $M_{10}$  и  $M_{11}$  записываются в три четырехразрядных регистра  $M_{12}$ – $M_{14}$ . Блок управления состоит из элементов  $M_{15}$ ,  $M_6$ ,  $M_{4-2}$ – $M_{4-4}$ ,  $M_{3-2}$ ,  $M_{1-4}$  и  $M_{5-6}$ . В этом блоке дешифрируются команды КАМАК и формируются управляющие сигналы для остальных блоков преобразователя БПВ-15.

Калибровочные измерения по определению ширины канала преобразователя БПВ-15 проводились с помощью измерительного стенда, функциональная схема которого приведена на рис. 3. Для определения ширины канала импульсы от генератора импульсов  $G_1$  (Г5-72) с частотой повторения  $\sim 1$  кГц подаются через дискриминатор  $D_1$  (LeCroy 623AL) на вход “Старт” времяцифрового преобразователя.

Импульсы второго генератора  $G_2$  (Г5-72), синхронизированные и задержанные по времени относительно импульсов генератора  $G_1$  (переключатель  $K$  в положении 1), после дискриминатора  $D_2$  (LeCroy 623AL) поступают на вход “Стоп” преоб-

разователя. Время задержки сигнала Стоп от сигнала Старт регулируется генератором  $G_2$ .

Значения временных интервалов, измеренные преобразователем, считываются в персональный компьютер через крейт-контроллер КК-009. При калибровочных измерениях интервалы времени между сигналами Старт и Стоп выставляются с шагом 5 мкс с точностью не хуже 1 нс с помощью аналогового быстродействующего осциллографа Tektronix 2465В. Затем сформированные таким образом временные интервалы измеряются в каналах в.ц.п. Из наклона измеренной зависимости результатов оцифровки от длительности временного интервала определяется значение ширины канала преобразователя, равное 67.4 нс.

Измерения интегральной и дифференциальной нелинейности преобразователя проводятся на том же стенде (рис. 3), но в этом случае генераторы  $G_1$  и  $G_2$  работают независимо друг от друга, т.е. взаимно не синхронизованы (переключатель  $K$  в положении 2). Частоты повторения импульсов обоих генераторов устанавливаются близкими к  $\sim 1$  кГц. Таким образом, обеспечивается случайный некоррелированный характер появления сигналов Старт и Стоп. Измерения продолжают до накопления более чем  $10^3$  событий в каждом канале преобразователя. Результаты измерений показали, что дифференциальная нелинейность не превышает 4%, а интегральная нелинейность составляет  $\leq 1\%$ .

Преобразователи БПВ-15 активно используются в настоящее время в лабораторных исследованиях как послеимпульсов ф.э.у., так и кинетики сцинтилляционного свечения ряда кристаллов [11, 12]. Обнаруженный в этих измерениях многоэкспоненциальный характер сцинтилляционного свечения кристалла  $\text{CaMoO}_4$  открывает но-

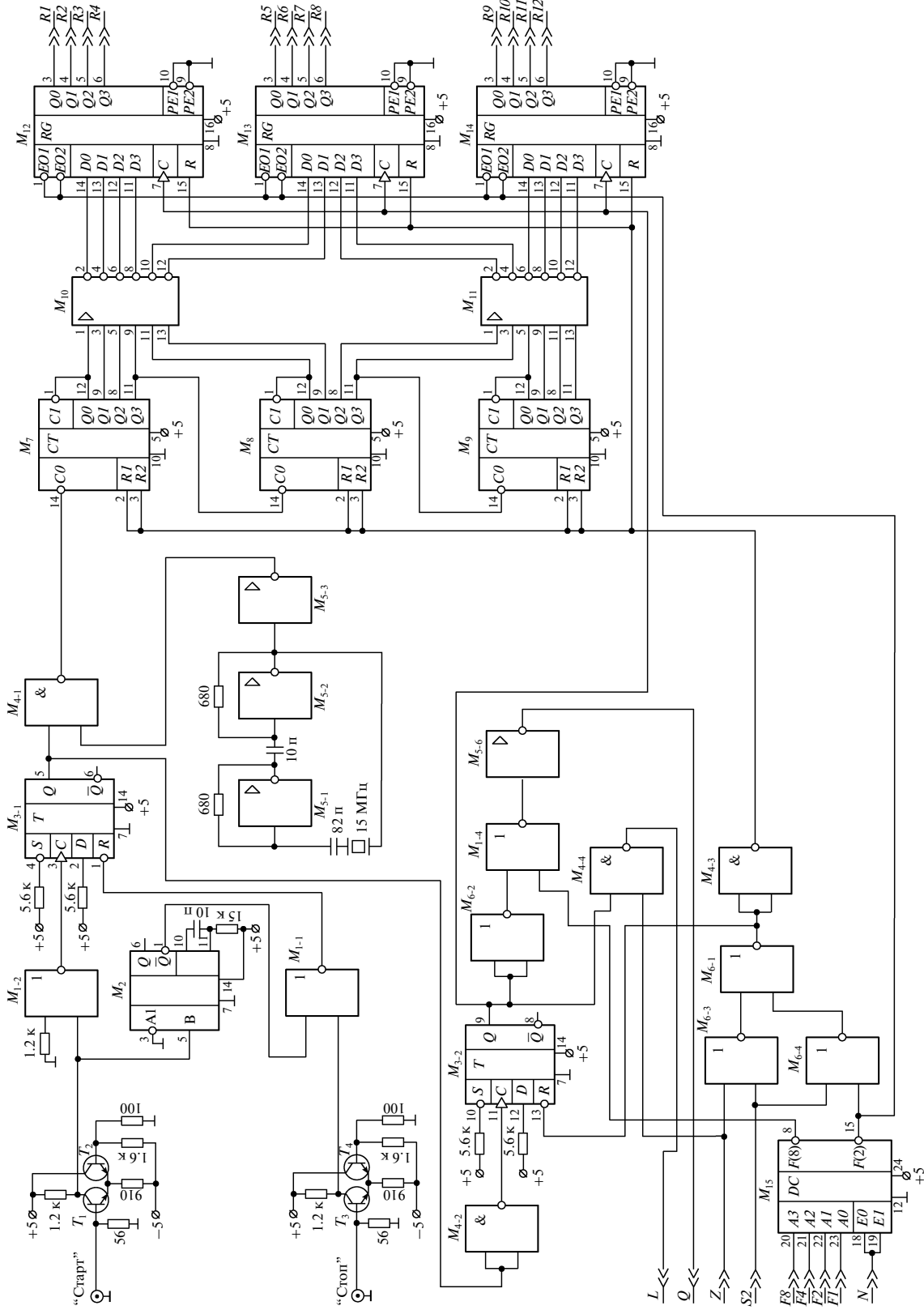
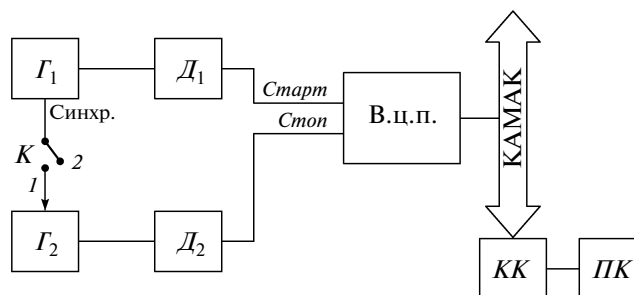
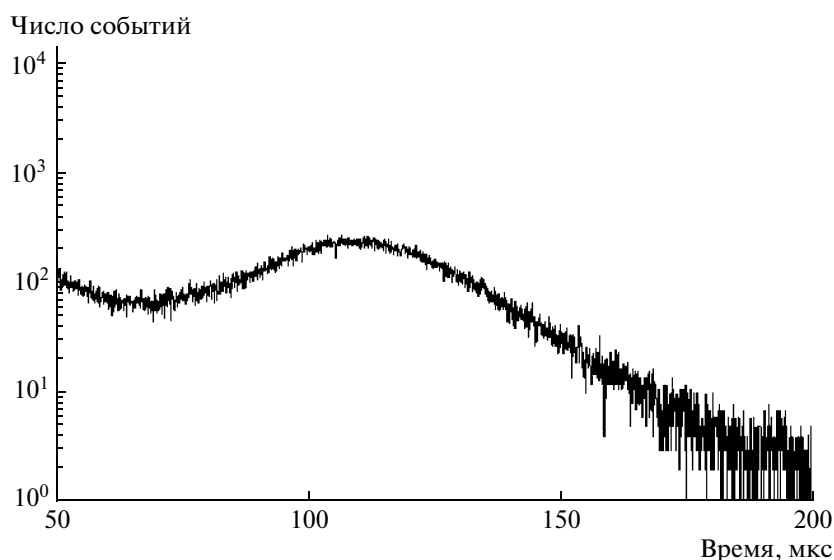


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя БПВ-15.  $M_1, M_6$  – К155ЛЕ1,  $M_2$  – К155ЛА12,  $M_3$  – К155АГ1,  $M_4$  – К155ТМ2,  $M_5$  – К155ЛН1,  $M_7$ – $M_9$  – К555ИЕ5,  $M_{10}, M_{11}$  – К155ЛН2,  $M_{12}$ – $M_{14}$  – К155ИР15,  $M_{15}$  – К155ИД3;  $T_1$ – $T_4$  – 2Т368А.



**Рис. 3.** Функциональная схема стенда для калибровочных измерений и исследований дифференциальной и интегральной нелинейности.  $G_1, G_2$  – генераторы импульсов Г5-72;  $K$  – переключатель;  $D_1, D_2$  – дискриминаторы LeCroy 623AL; в.ц.п. – времяцифровой преобразователь БПВ-15; КК – крейт-контроллер КК-009; ПК – персональный компьютер IBM-PC/AT-486.



**Рис. 4.** Распределение времен задержек послеимпульсов от основного импульса в диапазоне ~50–200 мкс для ф.э.у. ЕМ19350.

вые возможности в планировании будущих экспериментов по поиску двойного безнейтринного  $\beta$ -распада ядер  $^{100}\text{Mo}$ .

При исследовании послеимпульсов в вакуумных ф.э.у. разного типа с помощью преобразователя БПВ-15 нами был обнаружен новый класс послеимпульсов с временами задержки от основного импульса в диапазоне ~80–200 мкс [13, 14]. На рис. 4 показано распределение времен задержек таких послеимпульсов, зарегистрированных ф.э.у. ЕМ19350. Зарядовое распределение этих послеимпульсов носит однофотозлектронный характер и их вероятность образования не превышает 0.1% на фотозлектрон.

Следует отметить, что в настоящее время такие послеимпульсы обнаружены только в нескольких ф.э.у. из большого числа исследованных ф.э.у. различного типа. Существование такого класса послеимпульсов не объясняется общепринятыми

на сегодняшний день моделями образования послеимпульсов в вакуумных ф.э.у. Поэтому необходимо дальнейшее тщательное изучение этого явления, поскольку, несмотря на малую вероятность образования, такие послеимпульсы могут накладывать ограничения на эксперименты по поиску редких событий, использующих временную информацию.

Авторы считают своим приятным долгом выразить свою искреннюю признательность В.Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи статьи и многочисленные ценные обсуждения и замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhrin S.B., Mishin A.N., Potopov A.S. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2002. V. 486. P. 295.*

2. *Mikhailik V.B., Henry S., Kraus H., Solskii I.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2007. V. 583. P. 350.
3. *Mikhailik V.B., Kraus H., Itoh M. et al.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. V. 17. P. 7209.
4. *Morton G.A., Smith H.M., Wasserman R.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1967. V. NS-14. P. 443.
5. *Staubert R., Böhm E., Hein K. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1970. V. 84. P. 297.
6. *Coates P.B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. V. 6. № 10. P. 1159.
7. *Coates P.B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. V. 6. P. 1862.
8. *Torre S., Antony T., Benetti P.* // Rev. Sci. Instrum. 1983. V. 54. № 12. P. 1777.
9. *Акимов Ю.К., Дражев М.Н., Колпаков И.Ф., Рыкалин В.И.* Быстродействующая электроника для регистрации ядерных частиц. М.: Атомиздат, 1970.
10. *Мелешко Е.А.* Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987.
11. *Вересникова А.В., Барабанов И.Р., Лубсандоржиев Б.К. и др.* // ПТЭ. 2009. № 1. С. 41.
12. *Veresnikova A.V., Lubsandorzhiev B.K., Barabanov I.R. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 603. P. 529.
13. *Полещук Р.В.* Магистерская диссертация. М.: МФТИ, 2005. 58 с.
14. *Лубсандоржиев Б.К., Полещук Р.В.* // Труды 52-й Научной конференции МФТИ. Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Ч. VIII. Проблемы современной физики. М.: МФТИ, 2009. С. 125.