



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

17/12-79

Щ-927

P13 - 12541

Г.Шорнак, Н.И.Замятин, Д.Леманн, Г.Музиоль,  
Г.Мюллер, Н.А.Невская

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ  
НА КОЛЛЕКТИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ  
Часть II. Аппаратура

1979

P13 - 12541

Г.Щорнак, Н.И.Замятин, Д.Леманн, Г.Музиоль,  
Г.Мюллер, Н.А.Невская

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ  
НА КОЛЛЕКТИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ  
Часть II. Аппаратура

Методика измерения характеристического рентгеновского излучения электронно-ионных колец на коллективном ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ. Часть. II. Аппаратура

Описан спектрометрический комплекс для измерения характеристического рентгеновского излучения электронно-ионных колец на коллективном ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ. Измерения проводятся с использованием сверхчистого Ge -детектора объемом  $0,7 \text{ см}^3$  с разрешающей способностью 170 эВ при энергии рентгеновских квантов 6 кэВ и 470 эВ при 122 кэВ. Далее обсуждаются возможности различных способов детектирования в условиях, существующих на коллективном ускорителе тяжелых ионов. Электронная аппаратура спектрометрического комплекса выполнена в стандарте КАМАК и работает на линии с малой ЭВМ типа М-6000.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Methodology of X-Ray Measurements on the JINR Collective Heavy Ion Electron-Ring Accelerator. Part II. Electronics

A X-ray spectrometer for X-ray measurements on the JINR collective heavy ion electron-ring accelerator is described. The measurements are accomplished with a high purity germanium detector with a volume of  $0.7 \text{ cm}^3$  and an energy resolution of 170 eV at 6 keV and 470 eV at 122 keV. The use of different detection methods under the working conditions of the collective heavy ion electron-ring accelerator is discussed. The electronic equipment of the spectrometer is performed in the CAMAC standard and works on-line with a small M-6000 computer.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе описан спектрометрический комплекс для решения задач получения количественных данных о степени ионизации атомов в электронном кольце КУТИ в зависимости от времени накопления и определения числа ионов в ионно-электронном кольце. Измерения характеристического рентгеновского излучения ионов, находящихся в электронном кольце КУТИ, дают нужную информацию для получения вышеуказанных параметров.

Исследование временного развития ионизации атомов проводится на основе экспериментального наблюдения сдвигов рентгеновских лучей, соответствующих определенным степеням ионизации атома, при использовании результатов расчета энергетических сдвигов рентгеновского излучения по методу Дирака-Фока-Слетера<sup>1,2/</sup>. Из числа регистрируемых в определенном интервале времени квантов рентгеновского К-излучения можно определить число ионов, находящихся в электронном кольце. Более подробно эти способы описаны в работе<sup>3/</sup>.

Для измерения характеристического рентгеновского излучения электронно-ионных колец на Дубненском прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов создан рентгеновский спектрометр на базе сверхчистого полупроводникового Ge-детектора. Спектрометр надежно экранируется от всех помех, которые могут влиять на работу рентгеновского спектрометра в условиях эксплуатации КУТИ.

Измерения проводятся так, что каждому кванту рентгеновского излучения ставится соответствующая временная отметка,

характеризующая временное расстояние между моментом регистрации кванта и началом загрузки электронного кольца ионами. Таким образом, после окончания измерения имеется возможность выбирать отдельные временные интервалы /“временные окна“/, в которых анализируется полученная спектроскопическая информация. В результате такого способа измерений можно получить ход ионизации атомов как функцию времени пребывания ионов в электронном кольце.

## **2. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ**

### **2.1. Общее описание**

Построен спектрометрический комплекс для анализа некоторых параметров электронно-ионных колец КУТИ ОИЯИ на основе измерения характеристического рентгеновского излучения этих колец. Комплекс используется на линии с ЭВМ. Блок-схема его дана на *рис. 1*.

Для измерения характеристического рентгеновского излучения используется сверхчистый Ge -детектор в связи с предусилителем, находящимся в пульсирующем режиме фотооптической обратной связи. Детектор находится в свинцовом экранировании, которое защищает его от импульсов тормозного излучения, возникающих во время работы КУТИ. Для защиты Ge -кристалла от возникающих быстрых нейтронов предусмотрено дополнительное парафиновое экранирование.

Энергетический сигнал усиливается в спектроскопическом линейном усилителе /ЛУ/, так что электроника может обрабатывать эти сигналы. Одновременно режектор наложения сигналов РН анализирует предварительно усиленные сигналы, чтобы отбирать наслаивающиеся импульсы. Сформированный в спектроскопическом усилителе сигнал изменяется в формирователе следующим образом: время нарастания и ширина импульсов варьируются так, что выходные импульсы оптимально совпадают с требованием на входные импульсы аналого-цифрового

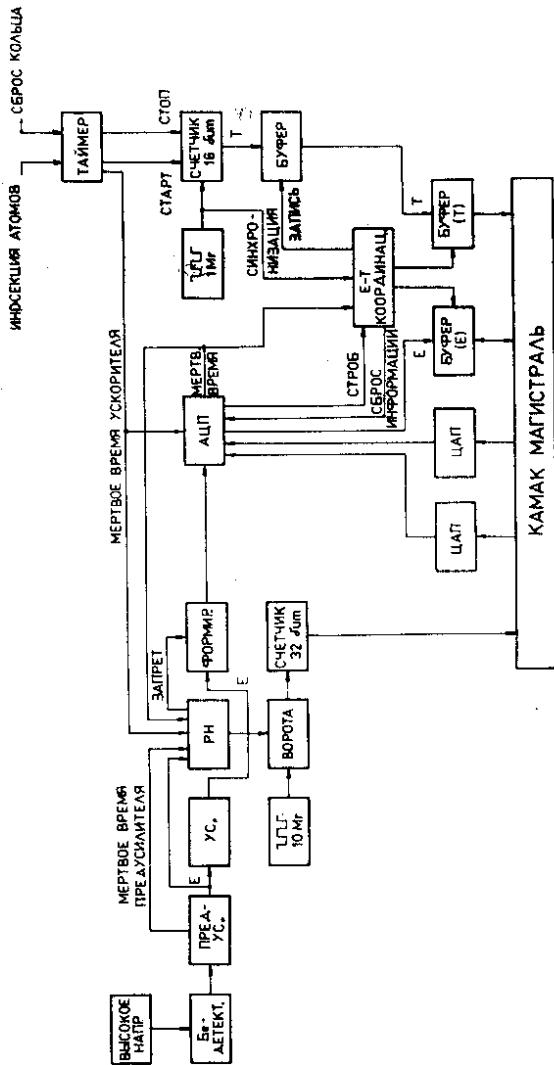


Рис.1. Схема измерительного комплекса для спектроскопии характеристического рентгеновского излучения электронно-ионных колец.

преобразователя /АЦП/ относительно времени нарастания и ширины импульсов. При помощи внешнего строба подавляются спектроскопические импульсы, для которых найдено наложение с помощью режектора, или если в предусилителе состоялся процесс фотооптической обратной связи. Кроме вышеописанных функций, режектор наложений выполняет суммирование отдельных компонент мертвого времени к сигналу мертвого времени системы. Этот сигнал закрывает вход счетчика, на котором подается последовательность импульсов с частотой 10 МГц. Содержание счетчика читается через КАМАК в ЭВМ и используется для определения настоящего времени измерения рентгеновского спектрометра.

Растянутый и сформированный энергетический сигнал анализируется аналого-цифровым преобразователем, который стробируется сигналом мертвого времени ускорителя. Этот сигнал характеризует время между моментами ускорения электронно-ионного кольца и началом новой загрузки электронного кольца ионами. Преобразование разрешается только для такого времени, в течение которого электронно-ионное кольцо находится в адгезаторе в сжатом состоянии.

Чтобы синхронно добавить к каждому спектроскопическому сигналу временную отметку, описывающую расстояние с момента начала загрузки электронного кольца ионами до момента регистрации отдельного кванта рентгеновского излучения, одновременно с началом загрузки электронного кольца запускается 16-разрядный синхронный счетчик, на вход которого подается последовательность импульсов с частотой 1 МГц. В начале преобразования АЦП дает сигнал мертвого времени, используемый для формирования сигнала строба промежуточной памяти, в которую пишется содержание синхронного счетчика.

После окончания преобразования формируются сигналы строба для двух блоков памяти с целью записи отдельно в эти блоки энергетической информации и соответствующих временных отметок. После заполнения блоков памяти /емкостью 256 слов по 16 разрядов/ их информация считывается в блочном режиме в ЭВМ М-6000. С помощью ЭВМ энергетическая информация вместе с соответствующими временными отметками накапливается на магнитной ленте для дальнейшей обработки.

Для стабилизации рентгеновского спектрометра следует исключить влияние колебания температуры, неустойчивости напряжения, изменения усиления и колебания нагрузки спектрометра квантовым потоком. Для этого необходимо анализировать изменение позиции выбранных рентгеновских линий в спектре. Из отклонения положений пиков от первоначальных /т.е. полученных в начале эксперимента/ в ЭВМ рассчитываются корректировочные значения для двух цифро-аналоговых преобразователей. Соответствующие напряжения, образующиеся в ЦАП, служат корректировочными значениями для нулевой позиции и крутизны нарастания конверсионной характеристики аналого-цифрового преобразователя.

## 2.2. Выбор детектора

На выбор детектора налагается ряд требований:

- 1/ высокое энергетическое разрешение;
- 2/ высокая эффективность регистрации квантов рентгеновского излучения в диапазоне энергии характеристического рентгеновского излучения тяжелых ионов;
- 3/ оптимальное отношение вероятности регистрации исследуемого излучения к радиационному фону, т.е. малая чувствительность при энергии квантов выше 100 кэВ.

В табл. 1 сравниваются энергетическое разрешение и полная эффективность различных видов спектрометров при энергии квантов рентгеновского излучения 10, 50 и 100 кэВ. Энергетическое разрешение у сверхчистых Ge-детекторов соответствует наилучшим результатам, представленным в <sup>1/4</sup> для детекторов различных объемов.

При относительно высоком энергетическом разрешении детекторы на основе полупроводниковых материалов обладают сравнительно высокой эффективностью. Поэтому такие детекторы особенно хороши для данного метода диагностики. Сравнение различных типов полупроводниковых детекторов показывает, что сверхчистый Ge-детектор наиболее подходит для измерения характеристического рентгеновского излучения тяжелых ионов.



Таблица

Энергетическое разрешение и полная эффективность различных спектрометров для выбранных энергий рентгеновского излучения. В скобках даны соответствующие телесные углы,  $\Delta E$  - энергетическое разрешение,  $\epsilon$  - полная эффективность детектора.

Детектор		10 кэВ	50 кэВ	100 кэВ
Сверхчистый германий /4/	$\Delta E$	190 эВ	300 эВ	400 эВ
	$\epsilon$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ (2%)	$2,0 \cdot 10^{-3}$ (2%)	$8,0 \cdot 10^{-4}$ (2%)
Ge(Li) /5/ 1 см <sup>3</sup>	$\Delta E$	270 эВ	360 эВ	475 эВ
	$\epsilon$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ (2%)	$2,0 \cdot 10^{-3}$ (2%)	$8,0 \cdot 10^{-4}$ (2%)
Si(Li) /5/ 30 мм <sup>2</sup> x 4 мм	$\Delta E$	180 эВ	-	-
	$\epsilon$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ (2%)	$3,8 \cdot 10^{-4}$ (2%)	$2,4 \cdot 10^{-5}$ (2%)
NaJ(Tl) /6/ 7,62 см x 7,62 см	$\Delta E$	-	2 кэВ	4,5 кэВ
	$\epsilon$	-	$1,0 \cdot 10^{-1}$ (10%)	$8,0 \cdot 10^{-2}$ (10%)
Кристалл-дифракционный спектрометр /6, 7/	$\Delta E$	8 эВ	30 эВ	200 эВ
	$\epsilon$	$4,0 \cdot 10^{-6}$ (0,005%)	$3,0 \cdot 10^{-7}$ (0,005%)	$6,0 \cdot 10^{-8}$ (0,005%)

Ход эффективности полупроводниковых Ge -детекторов позволяет проводить измерение характеристического рентгеновского излучения с приблизительно равномерной эффективностью.

При использовании Si(Li) -детекторов спектрометрия квантов характеристического рентгеновского излучения тяжелых ионов возможна с той же самой эффективностью, что и у Ge -детекторов, только до энергии 25 кэВ. При энергии квантов 50 кэВ в Si(Li) -детекторах теряется 81%, и при 100 кэВ - уже 97% эффективности по сравнению с Ge -детекторами<sup>/8/</sup>.

Использование сверхчистых Ge -детекторов облегчается тем, что нагревание детектора, в отличие от Si(Li) - или

Ge(Li) -детекторов, не изменяет его свойств. Сверхчистый Ge -детектор может быть восстановлен при радиационной вредности, вызванной нейтронами из радиационного фона ускорителя '9-12/.

### 2.3. Электронная аппаратура

Используемый детектор и аналоговая электроника являются промышленной электроникой фирмы "Princeton  $\gamma$ -Tech", аналогово-цифровой преобразователь и блоки памяти - производства фирмы "Schlumberger". Остальные приборы разработаны в ОНМУ ОИЯИ. В дальнейшем дается краткое описание всей электроники с точки зрения предполагаемых экспериментов.

Так как при относительно высоких энергиях  $\gamma$  -квантов энергетическое разрешение полупроводниковых детекторов определяется в основном статистическими флуктуациями при возникновении носителей заряда в полупроводниковом кристалле, в диапазоне энергий характеристического рентгеновского излучения тяжелых ионов минимальный шум импульсного усилителя играет более существенную роль. Чтобы исключить вклад электронного шума, используется предусилитель со стробирующей обратной фотооптической связью. Оптическая связь применяется для исключения превышения напряжения данной динамической области у выхода предусилителя. При этом освещение ворот полевого транзистора служит для поддержания напряжения выходного уровня предусилителя между двумя уровнями  $V_0$  и  $V_1$ .

Большую часть времени предусилитель находится в условиях пренебрежения зарядами без обратной связи постоянного тока и, таким образом, без входного шума, который связан с обратной связью постоянного тока. Использование предусилителя с обратной фотооптической связью требует от усилителя, чтобы во время активизации обратной фотооптической связи не происходило перерегулирования, так как при этом возникают импульсы большой отрицательной амплитуды. Эти импульсы преобразуются в усилителе в импульсы положительной полярности, амплитуда которых значительно превышает высоту входных импульсов, которые превышают линейный участок характеристики усилителя.

Чтобы при высокой скорости счета получить оптимальное энергетическое разрешение, в усилителе предусмотрена компенсация полюса нулем и восстановление базовой линии. Использование гауссовского формирования импульсов представляет собой оптимальный компромисс между противоположными требованиями максимального отношения полезного сигнала к шуму и минимальной чувствительностью выходной амплитуды при изменении времени нарастания импульсов в детекторе.

Для исключения асимметрии спектральных линий за счет наложения импульсов при высокой скорости счета используется детектор наложения пиков. Вместе со счетчиком импульсов этот блок можно также использовать для определения реального времени измерения спектрометра. Основная схема действия детектора наложения пиков и часы реального времени показаны на *рис. 2*.

Аналоговый сигнал предусилителя /*рис. 2а*/ усиливается и формируется в быстром усилителе. Затем он проверяется дискриминатором относительно определенного базового уровня. Если этот сигнал превышает данный уровень, дискриминатор формирует импульс определенной ширины и высоты /*рис. 2б*/. Сигнал "Усилитель занят" /*рис. 2в*/ начинается с заднего фронта выходного импульса дискриминатора и держится в течение времени, которое приблизительно соответствует времени спада аналогового выходного импульса линейного усилителя на свою базовую линию.

Сигнал "Усилитель занят" суммируется со всеми другими сигналами мертвого времени /мертвое время аналого-цифрового преобразователя, мертвое время ускорителя/ и образует сигнал "Система занята" /*рис. 2г*/. Он действует в случае, когда часть системы занята. Импульс, прибывший во время существования сигнала "Усилитель занят", поддерживает этот сигнал и пускает новый интервал времени. При совпадении между сигналом "Усилитель занят" и выходным сигналом дискриминатора возникает сигнал разложения импульсов /*рис. 2г*/. Вследствие совпадения выходного сигнала дискриминатора и сигнала "Система занята" образуется сигнал строба, исключающий анализ импульсов во время существования сигнала "Система занята". Для определения настоящего времени измерения спектрометра используется счетчик, на входе которого подается серия импульсов с частотой

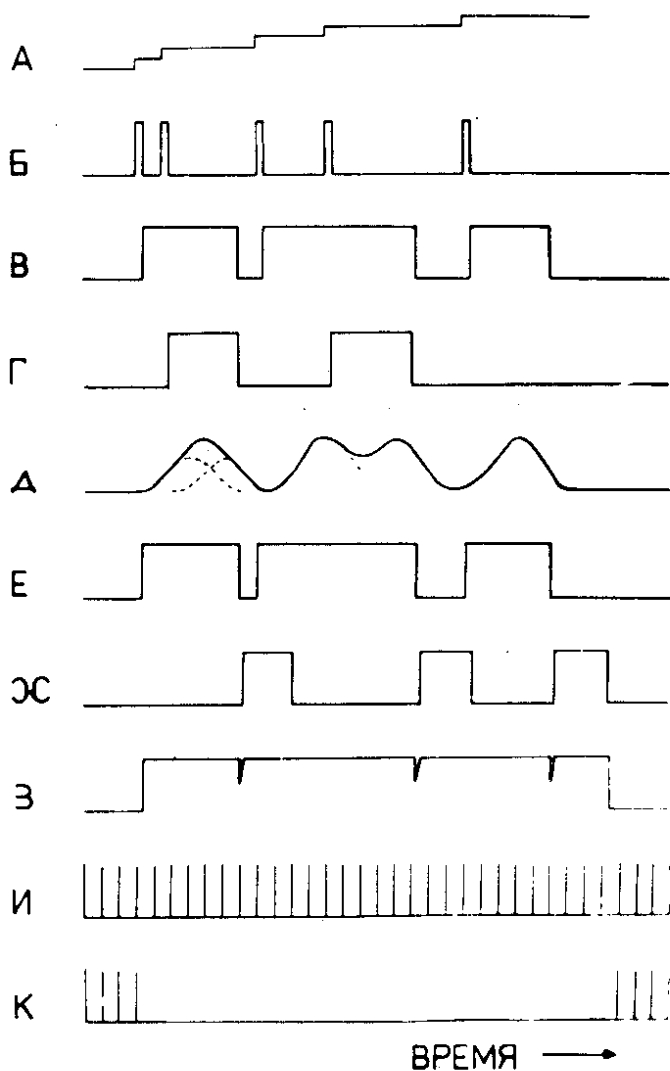


Рис.2. Временная диаграмма детектора наложенных пиков и часы настоящего времени измерения <sup>137</sup> /13/.

10 МГц /рис. 2ж/. Этот счетчик стробирован суммарным сигналом мертвого времени /рис. 2з/, так что считаются импульсы, соответствующие настоящему времени измерения /рис. 2к/. Правильный суммарный сигнал мертвого времени соответствует сигналу "Система занята", увеличенному на значение времен-

ного интервала /рис. 2ж/, соответствующего времени нарастания аналогового выходного импульса усилителя /рис. 2д/.

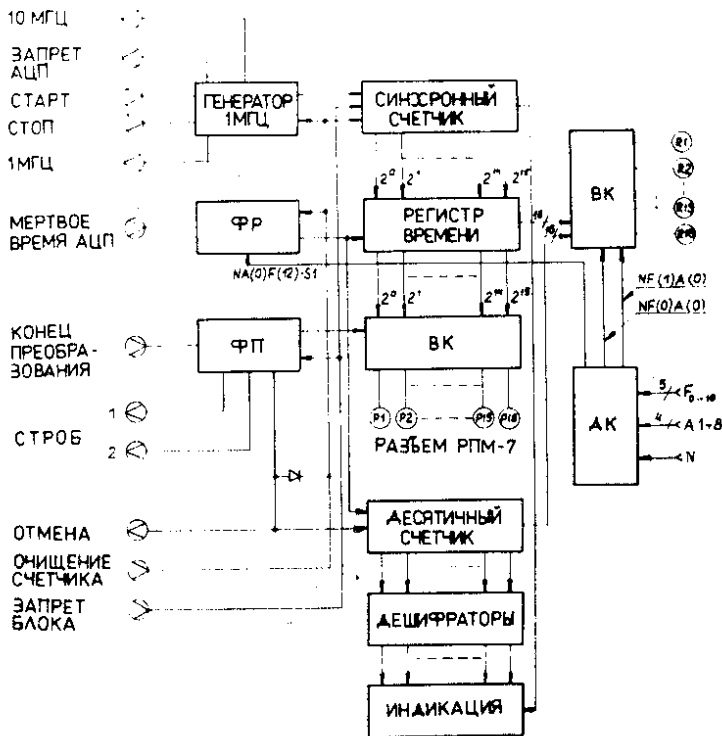
За детектором наложения пиков находится блок, состоящий в основном из каскада растяжения импульсов и гарантирующий максимальную совместимость с используемым аналого-цифровым преобразователем. Этот блок реализует следующие функции:

- 1/ дискриминация импульсов выше 10,5 В;
- 2/ дискриминация с низким устанавливаемым порогом /100 мВ/, действующим как детектор наложения импульсов на задний фронт импульсов;
- 3/ установление базовой линии у входа и выхода;
- 4/ внешнее стробирование через совпадения/антисовпадения;
- 5/ образование импульсов равного времени нарастания и ширины для максимальной совместимости с используемым АЦП.

Используемый АЦП имеет тактовую частоту 200 МГц. Таким образом, время преобразования аналогового сигнала в цифровой код не превышает 35 мкс при использовании 4096 каналов. Чтобы исключить мертвое время АЦП, в блоки памяти, обладающие аккумулирующей способностью 256 16-разрядных слов, пишутся цифровые значения в виде 14-разрядных параллельных слов. Если память исчерпана, их содержимое передается через КАМАК в ЭВМ М-6000.

Разработан блок управления, который содержит функциональные блоки таймера, генераторы импульсов с частотой 1 и 10 МГц, счетчик /16 бит/, синхронный двоичный регистр значений времени, буфер E-T-координации /рис. 1/. Этот блок служит для того, чтобы во время накопления ионов в электронном кольце добавить каждому кванту характеристического рентгеновского излучения соответствующую временную отметку. Функциональная схема блока управления приведена на рис. 3. Временная диаграмма блока управления показана на рис. 4.

С сигналом "Старт" импульс частотой 1 МГц поступает на вход синхронного двоичного счетчика времени. В АЦП начинается преобразование спектроскопического импульса, и по переднему фронту сигнала мертвого времени АЦП вырабатывается строб записи значения текущего времени в соответствующий регистр /строб 1/.



*Рис.3. Функциональная схема блока управления. ФР - формирователь строба записи текущего времени в регистр; ФП - формирователь строба записи значения Е и Т в память, ВК - выходные ключи на внешний разъем или на R шины; ДК - дешифратор КАМАК.*

Строб записи соответствует по фазе частоте временных меток. Если измерение не выходило за пределы установленного цифрового порога АЦП, то в АЦП вырабатывается сигнал "Конец преобразования", который используется как сигнал строба для записи значения времени из регистра блока управления через внешний разъем в буферную память и для записи значения энергии в другой блок памяти /строб 2/. По окончании времени записи в память управления генерируется сигнал "Отмена", поступающий на соответствующий вход АЦП, подготавливая его к следующему измерению.

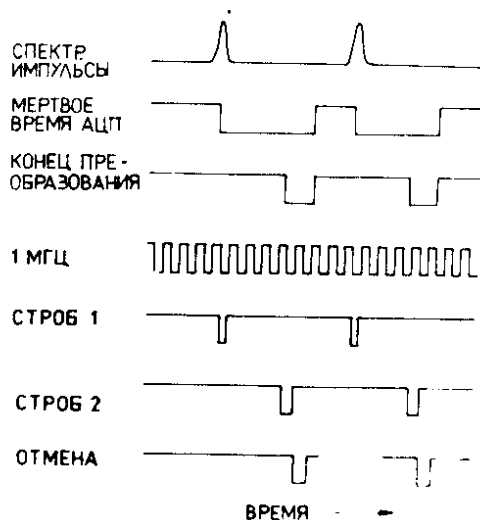


Рис.4. Временная диаграмма блока управления.

По сигналу "Стоп" закрываются ворота для сигналов частоты меток времени, синхронный счетчик занимает свое исходное положение, входные ворота АЦП закрываются управляемым импульсом. Таким образом, исключается анализ вне выбираемого временного окна, так что возникающие мощные импульсы тормозного излучения не влияют на спектр характеристического рентгеновского излучения.

Результаты исследования свойств данного спектрометра и поведения его в условиях работы прототипа КУТИ ОИЯИ покажут работоспособность спектрометра при сложных радиационных условиях КУТИ. Обзор этих результатов будет дан в отдельной публикации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зиберт Х.-У. и др. ОИЯИ, Р9-9657, Дубна, 1976.
2. Щорнак Г. и др. ОИЯИ, Р7-11876, Дубна, 1978.
3. Щорнак Г., Музиоль Г. ОИЯИ, Р13-12540, Дубна, 1979.

4. Bertolini G., Restelli G. "Spectrometry with Solid-State Detectors", in "Atomic Inner-Shell Ionization Processes", Vol.II, edited by B. Crasemann, Academic Press, New York San Francisco London 1975.
5. Ortec Nuclear Catalog, Oak Ridge, May 1973.
6. Вылов Ц. и др. "Спектрометрия излучений радиационных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов". В сб.: "Прикладная ядерная спектроскопия". Атомиздат, М., 1976, вып. 6.
7. Boehm F., "Isotope Shifts, Chemical Shifts and Hyperfine Interaction of Atomic K-X-Rays", in "Atomic Inner-Shell Ionization Processes", Vol.I, edited by B.Crasemann, Academic Press, New York San Francisco London 1975.
8. Intrinsic Germanium Instruction Manual, Princeton Gamma-Tech, Princeton 1973.
9. Chasman C. et al. Nucl.Instr.Meth., 1965, 37, p.1.
10. Stelson P.H., et al. Nucl.Instr.Meth., 1972, 98, p.481.
11. Gouldin F.S., Pehl R.H. IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-19,91, 1972.
12. Llacer J., Kraner H.W. Nucl.Instr.Meth., 1972, 98, p.467.
13. Model 343 Pile-up Rejector/Livetime Corrector Instruction Manual, Princeton Gamma-Tech, Princeton 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июня 1979 года.