

О. И. Кочетов, А. В. Саламатин, А. В. Цвященко<sup>1</sup>,  
З. З. Аксельрод<sup>2</sup>, В. А. Антюхов, Я. Буша<sup>3</sup>, А. И. Величков,  
Н. А. Королев, М. Миланов<sup>4</sup>, А. Ф. Новгородов,  
И. В. Островский, В. Н. Павлов, Я. Скриванек<sup>3</sup>,  
В. В. Тимкин, Д. В. Философов, Л. Н. Фомичева<sup>1</sup>,  
Е. Н. Ширани<sup>1</sup>, И. Штекл<sup>5</sup>, В. Б. Бруданин

## СПЕКТРОМЕТР ВУК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

---

<sup>1</sup>Институт физики высоких давлений, Троицк, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

<sup>3</sup>Университет им. П. Е. Шафарика, Кошице, Словакия

<sup>4</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София

<sup>5</sup>Чешский технический университет, Прага

## Введение

Изучение взаимодействия атомного ядра с электрическими и магнитными полями, создаваемыми электронами в свободных атомах и в конденсированных средах, — основной предмет физики сверхтонких взаимодействий (СТВ).

Одним из ядерно-спектроскопических методов исследования СТВ является метод возмущенных угловых корреляций каскадных  $\gamma$ -квантов, излучаемых при распаде радиоактивных ядер-зондов ( $\gamma\gamma$ -ВУК). Метод  $\gamma\gamma$ -ВУК позволяет определить параметры СТВ, характеризующие электронное и спиновое окружение ядра (градиент электрического поля (ГЭП) и/или магнитное поле).

Для физики твердого тела этот метод интересен с точки зрения изучения электрических и магнитных полей в веществе, их динамики. Одним из перспективных направлений является изучение влияния высокого давления на электронную и магнитную структуру твердых тел. Такие исследования проводятся также с использованием дифракции нейтронов и рентгеновского излучения, мессбауэровской спектроскопии, ядерного магнитного резонанса. Вышеупомянутые методы не всегда позволяют получить полную информацию о ГЭП — важной характеристике электронной структуры твердого тела, которая может быть получена из первопринципных расчетов зонной структуры твердого тела.

Для измерения характеристик сверхтонкого взаимодействия квадрупольного и/или магнитного моментов ядра с внутрикристаллическими электрическими и/или магнитными полями при высоком давлении наиболее перспективным, как оказалось, является метод ВУК. Метод  $\gamma\gamma$ -ВУК является универсальным методом исследования вещества. Он позволяет проводить исследования (в том числе *in vivo*) с использованием предельно малых концентраций радионуклидов-зондов (вплоть до  $10^{-15}$  М) для любых агрегатных состояний вещества, как то газ, жидкость, твердое тело.

### 1. Метод $\gamma\gamma$ -ВУК

Теория метода  $\gamma\gamma$ -ВУК детально разработана и подробно описана в литературе [1]. Угловое распределение ядерного излучения определяется ориентацией спинов ядер в момент испускания излучения. Ансамбль ядер с определенной ориентацией спинов

может быть получен, например, в процессе регистрации двух каскадных  $\gamma$ -квантов (рис.1-).

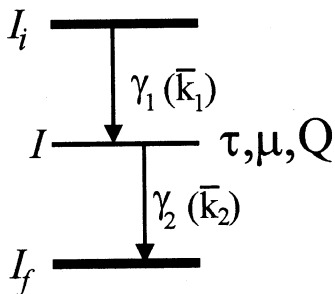


Рис. 1. Упрощенная схема распада ВУК-изотопа:

$I, \tau, \mu$  и  $Q$  — спин, время жизни, магнитный дипольный и электрический квадрупольный моменты промежуточного состояния соответственно;  $I_i$  и  $I_f$  — спины начального и конечного состояний;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  —  $\gamma$ -кванты, заселяющий и разряжающий промежуточный уровень,  $\bar{k}_1$  и  $\bar{k}_2$  — волновые векторы.

В случае испускания каскадных  $\gamma$ -квантов ядром, не взаимодействующим с внешними полями, вероятность излучения  $\gamma_2$  под углом  $\theta$  к направлению вылета первого  $\gamma_1$  может быть записана в виде

$$W(\theta) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} A_k P_k(\cos \theta),$$

где индексы суммирования  $k$  — четные;  $A_k$  — коэффициенты угловой корреляции, зависящие от спинов ядра в состояниях, связанных с каскадом, и мультипольностей переходов  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ ;  $P_k(\cos \theta)$  — полиномы Лежандра.

Если за время жизни  $\tau$  промежуточного уровня ( $I$ ) на ядро действуют достаточно сильные внеядерные поля, то их взаимодействие (сверхтонкое) с ядром может привести к изменению ориентации спина ядра. В этом случае функция угловой корреляции становится зависящей от времени и может быть записана в виде

$$W(\theta, t) = \sum_{k=0}^{k_{\max}} A_k G_k(t) P_k(\cos \theta),$$

где  $G_k(t)$  — коэффициенты возмущения, содержащие информацию о СТВ, а следовательно, об окружении ядра-зонда. Вид функции  $G_k(t)$  определяется типом

(магнитное дипольное или электрическое квадрупольное) и характером (статическое или динамическое) СТВ.

Например, фактор возмущения для статического квадрупольного электрического взаимодействия в случае аксиально-симметричного градиента электрического поля (ГЭП) можно записать так:

$$G_k(t) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} s_{nk} \cos(n\omega_0 t),$$

где  $s_{nk}$  — геометрические коэффициенты, протабулированные для различных значений спина  $I$ ;  $\omega_0 = E_{\text{СТВ}}/\hbar$  — частота СТВ,  $E_{\text{СТВ}}$  — энергия СТВ,  $\hbar$  — постоянная Планка.

В случае статического магнитного взаимодействия

$$G_k(t) = \frac{1}{2k+1} \sum_{q=-k}^k \cos q\omega_L t,$$

где  $\omega_L$  — ларморовская частота прецессии ядерного спина.

В случае комбинированного СТВ, когда наряду с магнитным дипольным взаимодействием присутствует электрическое квадрупольное взаимодействие, энергия СТВ равна

$$E(m) = -g\mu_N Bm + \frac{e^2 q Q}{4I(2I-1)} [3m^2 - I(I+1)],$$

где  $\mu_N$  — магнетон Бора,  $g$  —  $g$ -фактор,  $B$  — магнитное сверхтонкое поле,  $m$  — магнитное квантовое число,  $e$  — заряд электрона,  $q$  — градиент электрического поля,  $Q$  — квадрупольный момент ядра,  $I$  — спин ядра.

Фактор возмущения  $G_k(t)$  и является величиной, определяемой в эксперименте  $\gamma\gamma$ -ВУК.

## 2. Методика измерения $\gamma\gamma$ -ВУК

Функция угловой  $\gamma\gamma$ -корреляции (как невозмущенной, так и возмущенной) может быть измерена с помощью спектрометра из двух детекторов, схема которого показана на рис.2. Один из детекторов может быть повернут на угол  $\theta$  вокруг вертикальной оси, которая задается положением источника, и число совпадений между  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  ( $N(\theta, t)$ ) для каждого угла  $\theta$  последовательно регистрируется устройством совпадений. Получаемые временные спектры (ВС)  $N(\theta, t)$  также называют "спектрами

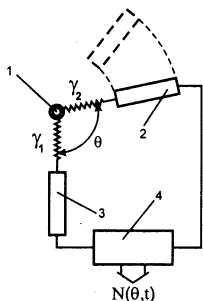


Рис. 2. Схема спектрометра ВУК:  
 1 — образец; 2, 3 — детекторы;  
 4 — блок совпадений

задержанных совпадений" (СЗС). Для расчета функции угловой корреляции (анизотропии) в ряде случаев достаточно получить СЗС для двух оптимально выбранных углов, например, при  $\theta = 90^\circ$  и  $180^\circ$  ("геометрия  $90^\circ$ ").

В тех случаях, когда  $A_4 = 0$  или, по крайней мере,  $A_4 \ll A_2$ , анизотропия угловой корреляции, определяемая как относительная разность:

$$R(t) = 2 \frac{N(180^\circ, t) - N(90^\circ, t)}{N(180^\circ, t) + 2N(90^\circ, t)},$$

связана с искомым фактором возмущения простым соотношением

$$R(t) = A_2 G_2(t) Q_2,$$

где  $Q_2$  — геометрическая поправка на конечный телесный угол детекторов.

Для практического приложения метода ВУК требуются спектрометры, обеспечивающие получение данных с хорошей статистической точностью в пределах разумного измерительного времени. Повышение эффективности спектрометров ВУК достигается увеличением числа детекторов, обычно до четырех или шести. Использование в эксперименте ВУК аппаратуры для создания высокого давления ограничивает число детекторов до четырех (в случае "геометрии  $90^\circ$ ").

### 3. Измерения ВУК при высоком давлении

Основными достоинствами метода ВУК для изучения вещества под высоким давлением являются:

- возможность использования изотопов с достаточно большой энергией  $\gamma$ -излучения, что существенно упрощает техническое оформление эксперимента;
- небольшой ( $0,3 \div 0,5 \text{ мм}^3$ ) объем образцов.

Использование многоступенчатой камеры высокого давления типа "матрешка" [2] позволяет генерировать давление до 60 ГПа в объеме, достаточном для проведения

измерений ВУК в образце, находящемся под давлением при температуре жидкого азота и выше.

Для проведения измерений ВУК под давлением четырехдетекторный спектрометр оснащен малогабаритным гидравлическим четырехколонным прессом усилием до 300 тонн, что позволяет использовать многоступенчатую камеру высокого давления (рис.3). В качестве первой ступени используется камера типа "тороид" [3] с диаметрами рабочей лунки 10 и 15 мм, в которой можно генерировать давление до 10 и 8 ГПа, соответственно.

В качестве второй ступени используются наковальни Брижмена, изготовленные либо из карбонадо (поликристаллический спек искусственных алмазов), либо из спека натуральных алмазов, что позволяет достигать давления порядка 60 ГПа.

Градуировка камеры проводится по скачкам сопротивления реперных веществ или по кривым зависимости остаточной плотности кварца от давления [2].

В качестве передающей и поддерживающей давление среды используются кварц и катлинит (окись Ca и Al) или пирофилит.

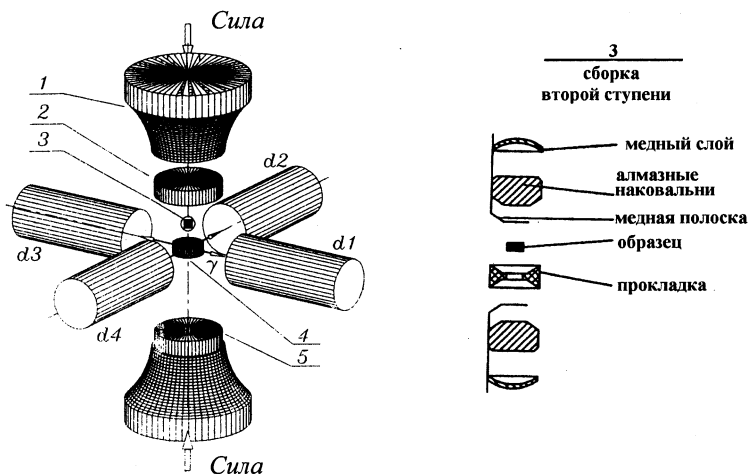


Рис. 3. Схема установки для измерений ВУК при высоком давлении:

1 — подложка, передающая усилие от пресса; 2, 5 — первая ступень камеры высокого давления: верхняя и нижняя часть; 3 — вторая ступень камеры высокого давления и образец (справа показана схема сборки второй ступени); 4 — катлиновая чечевица, передающая и поддерживающая давление

#### 4. Термостат

Для измерения температурных зависимостей параметров СТВ спектрометр оборудован термостатом.

Головная часть термостата (рис.4) насаживается плотно на вертикальный конец вакуумированного сифона, который опущен в дьюар с азотом через герметичную капку на горловине. Нижний конец сифона располагается вблизи уровня жидкого азота, но может быть и погружен в него. Для создания нужного потока холодного пара азот в дьюаре подогревается теплопередачей по медному стержню, верхний конец которого выходит через капку в область с комнатной температурой. Холодный пар азота проходит через полнопоточный теплообменник из спеченного крупнозернистого медного порошка и догревается с помощью электрического нагревателя. Контроль и стабилизация температуры в области расположения экспериментального образца ведется с помощью термопары. Термостат позволяет легко перекрыть интервал температур от  $+80^{\circ}\text{C}$  до  $-130^{\circ}\text{C}$  и поддерживать температуру с точностью  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  без электронной стабилизации.

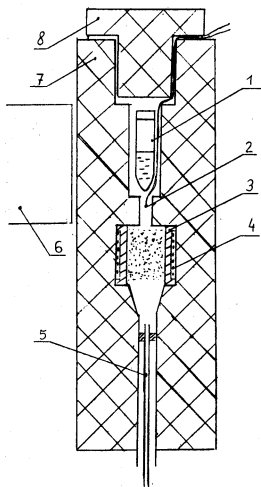


Рис. 4. Головная часть термостата:

- 1 — капсула с исследуемым образцом; 2 — термопара; 3 — полнопоточный теплообменник из спеченного крупнозернистого медного порошка; 4 — нагреватель;
- 5 — вакуумированный сифон; 6 — детектор; 7 — пенопластовая теплоизоляция;
- 8 — пенопластовая пробка

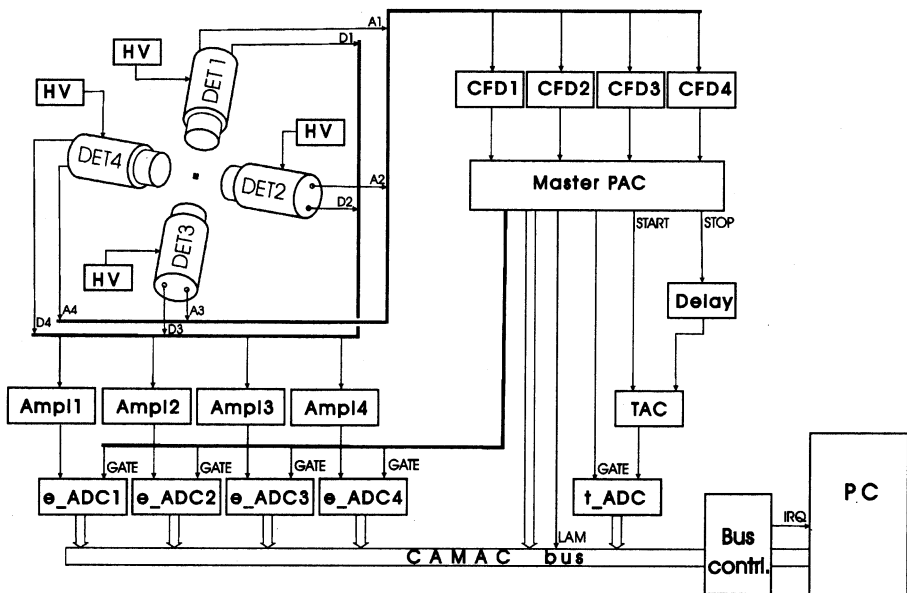


Рис. 5: Блок-схема 4-детекторного спектрометра.

## 5. Блок-схема и принцип работы спектрометра

Блок-схема спектрометра ВУК представлена на рис.5.

Детекторы спектрометра состоят из цилиндрических кристаллов  $\text{BaF}_2$  (размером  $40 \times 40$  мм), оптически связанных с ФЭУ XR2020Q.

Временная привязка осуществляется по анодному сигналу детектора с использованием constant-fraction дискриминатора (CFD) Canberra 2126. Динодный выход ФЭУ связан с формирующим спектрометрическим усилителем («Amp1»).

Программно-аппаратные средства спектрометра обеспечивают накопление информации в двух режимах:

- основной, регистрация 12 временных спектров совпадений (СЗС) и 4 вспомогательных энергетических спектров;
- режим настройки, используется для тестирования и регулировки спектрометра.

Во время эксперимента (основной режим) модуль «Master PAC» обеспечивает отбор двух совпавших по времени событий для любой пары детекторов. Диапазон времени совпадений задается переключателем на лицевой панели модуля. При появлении совпадений «Master PAC» вырабатывает сигналы GATE, запускающие



регистрирующую аппаратуру, а на выходах START и STOP вырабатываются информационные импульсы. Интервал времени между ними равен разнице следования сигналов от детекторов. За счет временного отбора в модуле «Master PAC» загрузка последующей регистрирующей аппаратуры от сигналов, не несущих полезную информацию (от неинформационных сигналов), снижается на два-три порядка. Такая разгрузка, наряду с возросшей производительностью современных компьютеров, позволяет выполнять более точный анализ поступающих сигналов и регистрировать расширенный объем данных.

Модуль TAC (преобразователь время-амплитуда ORTEC 467), получая сигнал START напрямую от «Master PAC», а STOP — через кабельную задержку DELAY, вырабатывает импульс, амплитуда которого пропорциональна временному интервалу START — DELAY/STOP. Положение переключателей на блоке «Master PAC», модуле TAC и величина кабельной задержки DELAY определяют диапазон измерения временных интервалов. Сигналы с TAC и от усилителей «Ampl1» – «Ampl4» поступают на аналого-цифровые преобразователи, на временной  $t\_ADC$  и энергетические  $e\_ADC1$  —  $e\_ADC4$ , соответственно. Модуль «Master PAC» импульсами GATE запускает ADC, а сигналами LAM-IRQ активирует процедуру регистрации данных в PC.

Активация процедуры регистрации данных происходит с использованием механизма «аппаратных прерываний». Сама программа считывания данных является резидентной, т.е. постоянно находится в оперативной памяти компьютера. Резидентная процедура и «аппаратные прерывания» обеспечивают высокую скорость реакции PC на сигнал LAM-IRQ и комфортный режим отображения накапливаемых данных. После запуска процедуры в PC и окончания преобразования в ADC данные через контроллер «Bus contrl.» поступают в ЭВМ. После пересылки данных начинается энергетический отбор, а измерительная аппаратура, не дожидаясь конца обработки последнего события, инициализируется (сбрасывается) для регистрации последующих событий. То есть аппаратура и PC работают параллельно в режиме «конвейера». Такая организация позволяет на 20—30% сократить просчеты.

В отличие от «Master PAC», где происходит быстрый отбор по времени при высоких входных нагрузках, ЭВМ по кодам  $e\_ADC$  производит отбор-сортировку по энергии. В программе для каждого детектора перед экспериментом установлены по два энергетических окна,  $\Delta E_{\gamma_1}$  — соответствует  $\gamma$ -кванту, заселяющему промежуточный уровень (см. рис.1.),  $\Delta E_{\gamma_2}$  — разряжающему. Код каждого  $e\_ADC$  сравнивается с

заданными для него окнами  $\Delta E_{\gamma_1}$  и  $\Delta E_{\gamma_2}$ . Если код одного из совпавших по времени  $e\_ADC$  попадет в окно  $\Delta E_{\gamma_1}$ , а код другого  $e\_ADC$  — в установленное для него окно  $\Delta E_{\gamma_2}$ , то событие считается полезным. Сработавшая пара детекторов (6 вариантов для 4 детекторов) и результат энергетического отбора (2 варианта) определяют один из 12 временных спектров совпадений куда будет добавлен код  $t\_ADC$ .

Во время эксперимента по кодам, поступившим от  $e\_ADC$ , производится не только отбор кодов  $t\_ADC$ , но и накопление 4 энергетических спектров. Т.е. код каждого из сработавших  $e\_ADC$  регистрируется в соответствующем энергетическом спектре. По эти спектрам контролируется стабильность работы детекторов во время эксперимента, а в дальнейшем при обработке может проводиться нормировка временных спектров.

Для защиты от непредусмотренных процессов и корректировки данных при работе с короткоживущими изотопами накапливаемые спектры периодически “спасаются” на диске PC.

Для проведения экспериментов в режиме многомерного анализа коды ADC от каждого события можно сохранять в режиме “event by event”, т.е. формировать файлы в которых будет последовательно записано каждое событие, состоящее из кодов двух  $e\_ADC$  и одного  $t\_ADC$ . После записи таких файлов можно приступать к формированию интересующих временных спектров, оптимизируя границы энергетических окон и другие параметры.

Количество детекторов в данном спектрометре может быть легко изменено. Не вызывает проблем увеличение числа энергетических окон для любого детектора, а также добавление датчиков давления, температуры и пр.

Существенные сложности в спектрометрах ВУК вызывает проверка и настройка аппаратуры. Для решения большинства возникающих вопросов в режиме настройки спектрометра предусмотрены дополнительные процедуры в программе и специальный режим работы модуля «Master PAC».

При запуске программной процедуры настройка/тестирование, по команде от ЭВМ, «Master PAC» переключается в соответствующий режим «Test mode». В этом случае запуск  $e\_ADC$  происходит не только при совпадениях, но и от каждого сигнала детектора. После преобразования код соответствующего  $e\_ADC$  заносится в компьютер. Для каждого детектора строятся энергетические спектры, по виду которых:

- оценивается работоспособность детекторов;

- подбираются энергетические диапазоны работы детекторов изменением величины высокого напряжения ФЭУ (модуль HV) и коэффициента усиления (модуль «Ampl»);
- устанавливаются пороги модулей временной привязки CFD;
- задаются границы энергетических окон  $\Delta E_{y_1}$  и  $\Delta E_{y_2}$  для процедуры регистрации событий в основном режиме.

Все регулировки выполняются без осциллографа и без перекоммутаций модулей. Переключать спектрометр в режим тестирования можно периодически во время набора данных.

Использование отбора событий по энергии в ЭВМ, в отличие от традиционного с одноканальными аппаратными дискриминаторами, позволило существенно упростить эксплуатацию спектрометра, улучшить контроль за набором данных, оптимизировать энергетический отбор и сократить время на настройку спектрометра.

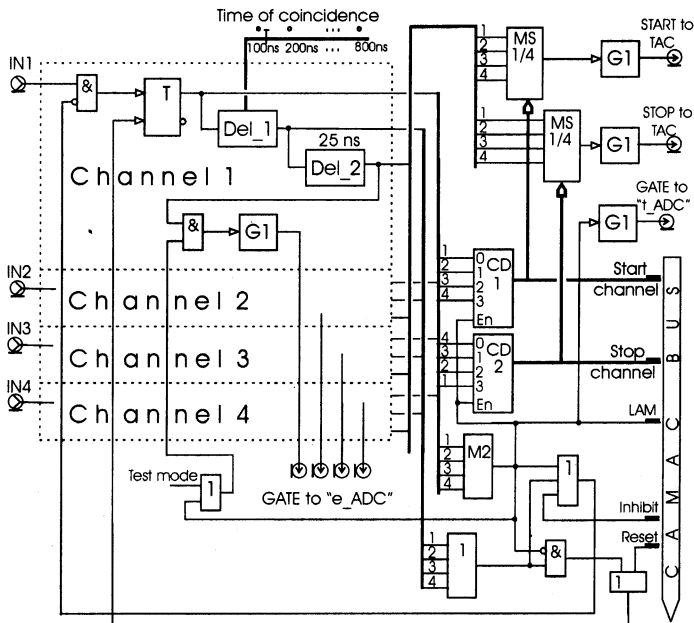


Рис. 6. Схема модуля «Master PAC»

## 6. Описание принципа работы блока «Master PAC»

Блок-схема «Master PAC» показана на рис.6. Как упоминалось в предыдущем разделе, «Master PAC» может работать в двух режимах — “основной” и “настройка”. Выбор режима задается командой от РС.

Функции модуля в основном режиме:

- определение совпавших в заданном временном диапазоне сигналов от любых двух детекторов;
- выработка импульсов START и STOP, интервал между которыми равен разнице между моментами появления сигналов от CFD;
- передача в ЭВМ номеров детекторов, сигналы которых появляются на выходах START и STOP;
- запуск ADC-преобразователей и процедуры считывания данных в ЭВМ.

В зависимости от интервала времени между появлением сигналов от детекторов возможны два варианта работы модуля «Master PAC»:

в первом — детекторы зарегистрировали излучение одновременно или друг за другом в заданном временном интервале — **вариант «совпадения»**;

во втором — после регистрации в одном из детекторов в течение заданного интервала времени три другие детектора не зарегистрировали излучения, т.е. совпадения отсутствуют — **вариант «совпадений нет»**.

Для каждого детектора в блоке предусмотрены индивидуальные каналы, содержащие схему блокировки входа (&), триггер (Т), кабельные задержки, составленные из двух последовательных схем (Del\_1, Del\_2) и схем запуска e\_ADC (&, G1). Первая кабельная задержка DEL\_1 — регулируемая, определяет время, в течение которого ожидается появление сигнала от других детекторов (время совпадений), фактически она определяет диапазон временных измерений. Вторая DEL\_2 — для задержки, необходимой при выработке решения и коммутации выходов START, STOP.

В случае варианта «совпадения» импульсы от двух детекторов одновременно или последовательно взводят триггеры Т в своих каналах. Сигналы от триггеров поступают на задержки DEL\_1 и мажоритарную схему совпадений (M2). При появлении единиц на любых двух входах мажоритарной схемы совпадений M2 на ее выходе появляется сигнал, который прежде всего блокирует все входы модуля на время

дальнейших операций (схема & на входе каждого канала). Начинается процесс принятия решения и коммутаций выходов START и STOP, т.е. определяется, сигнал какого детектора выработает импульс на выходе START, а какой на выходе STOP. Сигнал от M2 переводит в активный режим приоритетные шифраторы CD\_1 для сигналов START и CD\_2 для STOP. Приоритеты шифраторов установлены в противоположном порядке: у шифратора CD\_1 максимальным приоритетом обладает первый канал, у CD\_2 — четвертый. Это означает, что код шифратора CD\_1 коммутирует выход START с каналом, имеющим меньший номер из сработавших, а код шифратора CD\_2 - выход STOP — с большим номером. Время принятия решения и коммутации меньше времени задержек в схемах DEL\_2, что обеспечивает корректную коммутацию даже при совпадении в конце заданного интервала. Мажоритарная схема совпадений M2 генерирует импульс GATE для запуска временного АЦП преобразователя ( $t_{ADC}$ ) и разрешает выработку GATE в сработавших каналах для энергетических преобразователей ( $e_{ADC}$ ).

Пока происходит преобразование аналоговых сигналов в код и их пересылка в ЭВМ, входы блока «Master PAC» закрыты. Это время составляет от 10 до 50 мкс. После окончания пересылки данных ЭВМ подает сигнал «Reset», по которому инициализируются все блоки спектрометра, а входы блока «Master PAC» переходят в открытое состояние.

В случае отсутствия совпадения (**вариант «совпадений нет»**) в течение времени распространения сигнала от одного из детекторов в DEL\_1 сигнал в других каналах не появляется, схема мажоритарных совпадений M2 не срабатывает. Через интервал времени, определяемый задержкой DEL\_1, сначала блокируются входы «Master PAC», а затем инициализируется весь модуль.

Просчеты в спектрометре определяются суммарной загрузкой от детекторов, временем преобразования-регистрации события для варианта «совпадение» и временем инициализации модуля «Master PAC» для варианта «совпадений нет».

Общая загрузка от четырех детекторов, как правило, не превышает 100000 соб./с (по 25000 соб./с от каждого детектора), а число совпавших событий в измерениях ВУК редко бывает более 3000 соб./с. Для варианта «совпадений нет» время инициализации составляет 100 нс. В этом случае «мертвое время» спектрометра составит  $100 \text{ нс} * 100000 = 10 \text{ мс}$ , т.е. не более 1% «реального» времени измерений. Для варианта «совпадение» среднее время преобразования/регистрация 30 мкс, а мертвое

время, соответственно,  $30 \text{ мкс} * 3000 = 9 \text{ мс}$ , т.е. также не более 1% времени измерений. Исходя из этого можно заключить: суммарные просчеты в спектрометре составят не более 2%.

В режиме “настройка” «Master PAC» подает сигналы GATE в e\_ADC при каждом появлении сигнала от модулей временных привязок (независимо от наличия совпадений).

Настройка самого модуля «Master PAC» состоит в установке времени совпадений. Для этого служит переключатель «Time of coincidence» на передней панели. Возможны восемь вариантов: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 и 800 нс. При выборе варианта необходимо учитывать соответствие временного диапазона конвертора TAC и величины задержки DELAY. Модуль задержки должен обеспечить появление сигнала STOP после START, т.е. задержка должна быть больше заданного времени совпадений. А конвертор время-амплитуда TAC — должен обеспечить диапазон не менее чем удвоенное время модуля задержек.

## **7. Программное обеспечение спектрометра $\gamma\gamma$ -ВУК. Организация набора и накопления данных**

Работой спектрометра управляет входящий в его состав IBM-совместимый компьютер. Большая часть программного обеспечения написана на языке PASCAL. Критичные с точки зрения времени выполнения участки программ написаны на языке ASSEMBLER.

Программное обеспечение спектрометра решает следующие задачи:

1. В режиме “настройка” организует набор четырех независимых (без учета совпадений) энергетических спектров от четырех детекторов. Это дает возможность:

- контролировать работоспособность детекторных трактов по виду спектров;
- устанавливать энергетический диапазон (изменяя высокое напряжение на ФЭУ и коэффициент усиления усилителей);
- устанавливать пороги дискриминаторов;
- устанавливать энергетические окна  $\Delta E_{\gamma_1}$  и  $\Delta E_{\gamma_2}$ , по которым в дальнейшем будет происходить сортировка совпадений.

2. В режиме “накопление” производит набор четырех энергетических и двенадцати временных спектров (рис.7). В этом режиме сигнал с энергетических АЦП попадает в соответствующие энергетические спектры только в случае регистрации совпадения, а сигнал с временного АЦП попадет в соответствующий временной спектр, только если энергии совпавших квантов попадают в выставленные в режиме “настройка” энергетические окна  $\Delta E_{\gamma_1}$  и  $\Delta E_{\gamma_2}$ . Каждому из 12 временных спектров соответствует своя комбинация сработавших детекторов и энергетических окон  $\Delta E_{\gamma_1}$  и  $\Delta E_{\gamma_2}$ . Программа периодически сохраняет данные на диске, не прерывая измерений.

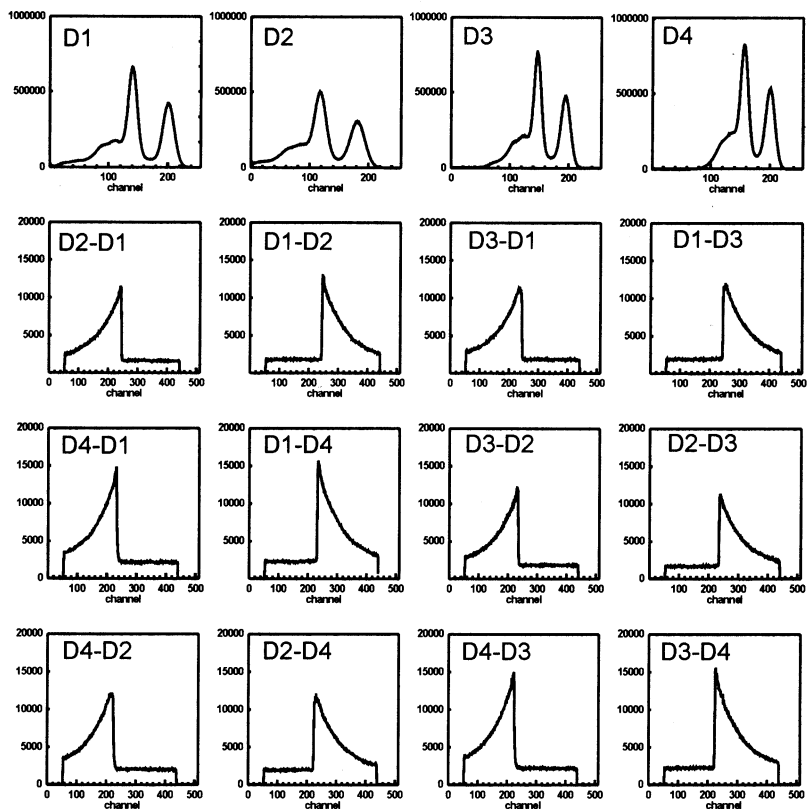


Рис. 7. 4 энергетических и 12 временных спектров, полученных с использованием In-111

## 8. Построение функции анизотропии

Построение функции анизотропии из временных спектров проводится по следующей схеме:

1. Из независимого измерения спектров мгновенных совпадений с  $^{60}\text{Co}$  определяются "нулевые" каналы для всех временных спектров. Производится поворот 6 спектров относительно их "нуля" и затем выравнивание всех спектров по "нулевым" каналам.

2. Производится нормировка временных спектров (ВС) на загрузку в окнах  $\Delta E\gamma_1$  и  $\Delta E\gamma_2$ . Нормировочный коэффициент  $K_i$  для  $i$ -го ВС:

$$K_i = \frac{SS_i}{\min\{SS_i\}},$$

где  $SS_i$  — загрузка в  $i$ -м спектре:  $SS_i = S_{start} \cdot S_{stop}$ ,  $S_{start}$ ,  $S_{stop}$  — число событий в окнах энергетических спектров, соответствующих "стартовому" и "стоповому"  $\gamma$ -квантам для конкретного ВС.

Нормировка спектра:

$$n_i^\theta(t) = \frac{n_i^\theta(t)}{K_i},$$

где  $n_i^\theta(t)$  — число событий в  $i$ -м ВС для угла  $\theta$  ( $90^\circ$  и  $180^\circ$ ).

3. Учёт фона случайных совпадений:

$$C_i^\theta(t) = n_i^\theta(t) - F_i^\theta(t),$$

где  $C_i^\theta(t)$  — число истинных совпадений,  $F_i^\theta(t)$  — фон случайных совпадений.

4. Поканальное перемножение ВС:

$$X_{90}(t) = \left[ \prod_{i=1}^8 C_i^{90}(t) \right]^{1/8},$$

$$X_{180}(t) = \left[ \prod_{i=1}^4 C_i^{180}(t) \right]^{1/4}.$$

5. Вычисление функции анизотропии:

$$R(t) = 2 \times \frac{X^{180}(t) - X^{90}(t)}{X^{180}(t) + 2 \cdot X^{90}(t)}$$

6. Вычисление статистической ошибки  $\sigma_{R(\theta)}$ :



$$\sigma_{R(t)} = 6 \cdot \frac{X^{180}(t) \cdot X^{90}(t)}{(X^{180}(t) + 2 \cdot X^{90}(t))^2} \cdot \left[ \sum_{\theta} \frac{1}{N_{\theta}^2} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\theta}} \frac{C_i^{\theta}(t) + 2 \cdot F_i^{\theta}(t)}{C_i^{\theta}(t)^2} \right]^{1/2}$$

Цена канала во временных спектрах, необходимая для дальнейших расчетов, определяется из независимого измерения с введением калиброванной задержки перед время-амплитудным преобразователем (ТАС).

## 9. Результаты экспериментов

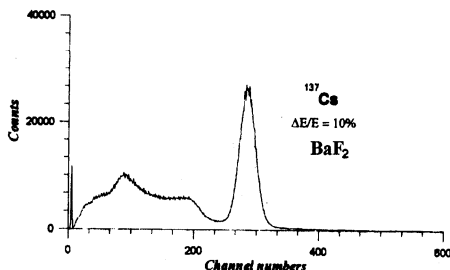


Рис. 8. Энергетический спектр  $^{137}\text{Cs}$

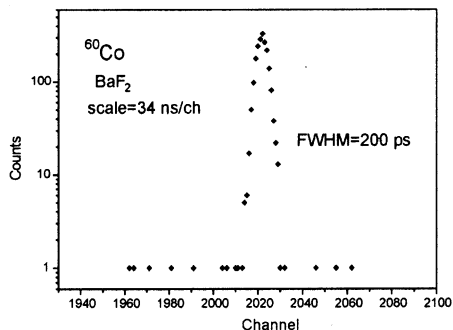


Рис. 9. Спектр мгновенных совпадений с источником  $^{60}\text{Co}$

При изучении характеристик спектрометра был проведен ряд экспериментов по определению временного и энергетического разрешения. Детекторы с кристаллами  $\text{BaF}_2$  и ФЭУ XR2020Q обеспечивают энергетическое разрешение  $\sim 10\%$  (662 кэВ  $^{137}\text{Cs}$ , рис.8.), временное разрешение  $\sim 600$  пс (FWHM) для  $\gamma$ - $\gamma$ совпадений 133 кэВ — 482 кэВ,  $^{181}\text{Ta}$  и  $\sim 200$  пс (рис.9.) для совпадений 1173 кэВ — 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . Для детекторов с  $\text{NaI}$ , энергетическое разрешение  $\sim 8\%$  (662кэВ), временное  $\sim 2$ нс — для совпадения 1173кэВ — 1332кэВ.

С использованием разработанного спектрометра был проведен ряд исследований ВУК в замороженных водных растворах с использованием  $^{111}\text{In}(\text{EC})^{111}\text{Cd}$ . Один из полученных спектров анизотропии представлен на рис.10. Подобные измерения были также проведены с  $^{111\text{m}}\text{Cd}(\text{IT})^{111}\text{Cd}$ .

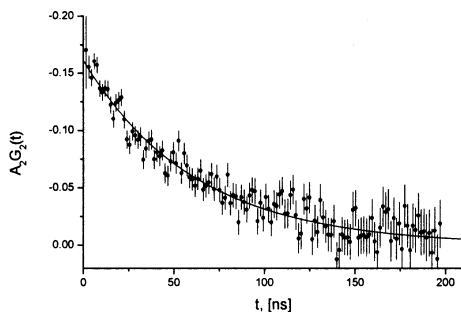


Рис. 10. Динамический характер ВУК ( $^{111}\text{In}(\text{EC})^{111}\text{Cd}$ ) во льду

Эти измерения позволили выявить механизм возникновения динамического характера ВУК во льду. Флуктуация градиента электрического поля в этой системе была объяснена подвижностью ионных и ориентационных дефектов [4].

Статический характер возмущения УК был продемонстрирован при изучении электрического квадрупольного взаимодействия ядер  $^{181}\text{Ta}$  в поликристаллическом  $^{181}\text{HfO}_2$  с моноклинной структурой. Спектр анизотропии угловой корреляции (рис.11) обрабатывали по модели электрического квадрупольного взаимодействия в предположении наличия одного кристаллографически-эквивалентного положения ядра-зонда по программе, описанной в [5]. Было определено, что все ядра  $^{181}\text{Ta}$  испытывают электрическое квадрупольное взаимодействие с  $\nu_Q = 760(5)$  МГц и  $\eta = 0.32(1)$ , что хорошо согласуется с данными, приведенными в ряде работ, например, в [6].

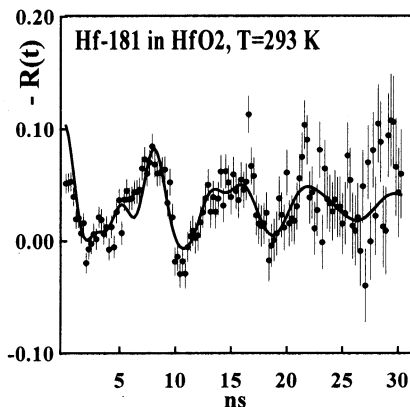


Рис.11. Спектр анизотропии ВУК ( $^{181}\text{Hf}(\beta^-)^{181}\text{Ta}$ ) для поликристаллического  $\text{HfO}_2$

В сверхпроводнике  $\text{MgB}_2$ , синтезированном при давлении 8 ГПа, была измерена температурная зависимость ГЭП на ядрах  $^{111}\text{Cd}$  в узлах бора. Значения ГЭП в узле В были определены из спектров анизотропии угловой корреляции (см. рис.12):  $V_{zz} = 18.6 \cdot 10^{16} \text{ В/см}^2$  при  $T = 143 \text{ К}$ , которые хорошо согласуются с расчетами из первых принципов [7].

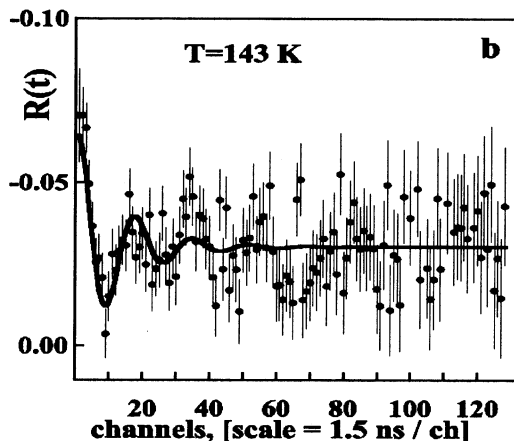


Рис. 12. Спектр анизотропии In-111 в  $\text{MgB}_2$

### Заключение

Создан 4-детекторный спектрометр возмущенных угловых  $\gamma\gamma$ -корреляций, обладающий следующими характеристиками:

- временной диапазон 1нс — 800 нс
- временное разрешение
  - с использованием кристаллов  $\text{BaF}_2$ :
    - $(^{60}\text{Co})$  1173 кэВ — 1332 кэВ — 200 пс;
    - $(^{181}\text{Ta})$  133 кэВ — 482 кэВ — 600 пс;
  - с использованием кристаллов  $\text{NaI}$ :
    - $(^{60}\text{Co})$  1173 кэВ — 1332 кэВ — 2.0 нс;
- энергетическое разрешение (662 кэВ —  $^{137}\text{Cs}$ )
  - $\text{BaF}_2$  — 10%,
  - $\text{NaI}$  — 8%.

В измерительный комплекс входит пресс со специально разработанной камерой высокого давления, обеспечивающей возможность измерения ВУК в образцах при давлении до 60 ГПа.

С использованием спектрометра ВУК проведен широкий круг исследований в области физики твердого тела, физической химии (структура жидких растворов).

Авторы благодарны Michal Rams (Институт физики Яглонского университета, Краков, Польша) за предоставление пакета программ для обработки спектров анизотропии.

### Литература

1. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия, вып. 3/ Под ред. К.Зигбана. Пер. с англ. А.А.Сорокина и др. М.: Атомиздат, 1969.
2. Ya.R.Bilyalov, A.A.Kaurov, and A.V.Tsvyashchenko, Rev. Sci. Instrum. **63**(4) (1992) 2311-2314.
3. L.G.Khvostantsev, L.F.Vereshchagin, and A.P.Novikov, High Temp. High Press. **9** (1977) 637.
4. З.З. Аксельрод и др. Исследование возмущенной угловой корреляции в  $^{111}\text{Cd}$  в замороженных растворах  $^{111}\text{In}$  и  $^{111\text{m}}\text{Cd}$ . Известия Академии наук. Серия физическая, том 65, № 7, с. 1077-1088, 2001.
5. T.Butz. Analytic perturbation functions for static interactions in PAC. Hyperfine Interactions **52**(1989)189-228.
6. A.Baudry et al. Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A **260**(1987)160-164.
7. A.V. Tsvyashchenko, L.N. Fomicheva, M.V. Magnitskaya, E.N. Shirani, V.B. Brudanin, D.V. Filossofov, O.I. Kochetov, N.A. Lebedev, A.F. Novgorodov, A.V. Salamatin, N.A. Korolev, A.I. Velichkov, V.V. Timkin, A.P. Menushenkov, A.V. Kuznetsov, V.M. Shabanov, Z.Z. Akselrod. Electric field gradients in  $\text{MgB}_2$  synthesized at high pressure:  $^{111}\text{Cd}$  TDPAC study and ab initio calculation. Solid State Communications, **119** (2001), 3 (june 17), 153-158.

Кочетов О. И. и др.

P13-2002-265

Спектрометр ВУК для исследования конденсированных сред

Создан 4-детекторный спектрометр возмущенных угловых  $\gamma\gamma$ -корреляций (ВУК) для исследований конденсированных сред. Спектрометр имеет временное расширение (при использовании ФЭУ XP2020Q и кристаллов  $BaF_2$ ) 200 пс по  $^{60}Co$ . В измерительный комплекс входит пресс со специально разработанной камерой высокого давления, обеспечивающей возможность измерения ВУК в образцах при давлении до 60 ГПа в режиме «on-line». Использование отбора событий по энергии в ЭВМ, в отличие от традиционного с одноканальными аппаратными дискриминаторами, позволило существенно упростить эксплуатацию спектрометра, улучшить контроль за набором данных и сократить время настройки спектрометра.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

#### Перевод авторов

Kochetov O. I. et al.

P13-2002-265

PAC Spectrometer for Condensed Matter Study

A four-detector perturbed angular  $\gamma\gamma$ -correlations (PAC) spectrometer for condensed matter study is described. The timing resolution (full-width at half-maximum) is 200 ps for  $^{60}Co$  if  $BaF_2$  scintillators coupled to photomultiplier XP2020Q are used. The spectrometer is equipped with a press; a specially-designed pressure vessel permits one to perform PAC-studies of samples under pressure up to 60 GPa in the on-line mode. In contrast to the common case (usage of single-channel analyzers) the software-controlled energy selection makes the spectrometer easy to use, to control and to adjust.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*  
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 15.12.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,19. Уч.-изд. л. 1,35. Тираж 325 экз. Заказ № 53661.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)