

ЖТЭ, 1972, № 6, с. 77-83.

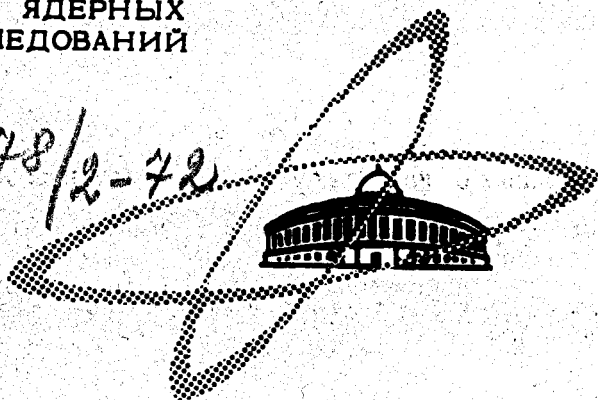
24/III 72

А-828

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

978/2-72



P6 - 6227

Р. Арльт, Г. Винтер, С.В. Медведь, Г. Музиоль,
А.Н. Синаев, З.А. Усманова, Д. Фромм,
Н.А. Чистов, Х. Штрусный

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

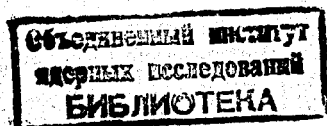
ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ
ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ,
СОДЕРЖАЩЕЙ НАКОПИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ЭВМ
1972

Р6 - 6227

Р. Арльт, Г. Винтер, С.В.Медведь, Г.Музиоль,
А.Н.Синаев, З.А.Усманова, Д.Фромм,
Н.А.Чистов, Х.Штрусный

ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ
ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ,
СОДЕРЖАЩЕЙ НАКОПИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ЭВМ

Направлено в ПТЭ



1. Введение

Интерес к спектроскопическому исследованию структуры ядра особенно возрос за последние годы, когда удалось проникнуть в новые области ядер, находящиеся далеко от полосы β -стабильности /1-3/. В ОИЯИ такие исследования ведутся с помощью полупроводниковых детекторов на установке и по программе ЯСНАПП /1,4-6/. Исследование ядер с коротким периодом полураспада и применение полупроводниковых детекторов, дающих большой объем спектроскопической информации, требуют нового методического подхода к измерению спектров и их обработке. Короткий период полураспада изучаемых ядер влечет за собой необходимость регистрации спектров в автоматизированном режиме /6/. Наиболее полное извлечение информации из этих спектров за время, соизмеримое с временем проведения эксперимента на ускорителе, также возможно только в режиме, включающем ряд автоматических процессов /6-15/.

В настоящее время наиболее оптимальным вариантом обработки спектров является проведение ее в два этапа /11-15/. Первый этап -

предварительная обработка; на этом этапе целесообразно предоставлять экспериментатору возможность самому контролировать и корректировать всю информацию, получаемую от измерительной электронной аппаратуры непосредственно в процессе эксперимента. Второй этап – окончательная обработка спектров – может производиться после окончания эксперимента на больших ЭВМ. На этом этапе важно иметь хорошее математическое обеспечение обработки, которое позволяло бы получать достаточно точные значения основных величин, необходимых для физической интерпретации результатов.

В настоящей работе описывается полуавтоматическая система обработки спектров от полупроводниковых детекторов, применяемая в Лаборатории ядерных проблем ОИ ЯИ.

2. Постановка задачи

Для извлечения необходимой информации из экспериментальных спектров используется обычно математический метод, заключающийся в нахождении параметров функции $Y_k(p_s)$, заданной математической моделью или теорией, по измеренным величинам N_k , где $Y_k(p_s)$ – совокупность функций $Y_1(p_s), Y_2(p_s), \dots, Y_m(p_s)$, p_s – совокупность параметров p_1, p_2, \dots, p_n , и N_k – совокупность измеренных величин N_1, N_2, \dots, N_m , причем $Mm > n$. Нахождение наиболее вероятных значений параметров p_s производится так, чтобы сумма квадратов отклонений рассчитанных значений от экспериментальных была минимальной, т.е. необходимо сведение к минимуму функционала

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^m w_k [Y_k(p_s) - N_k]^2 / (m-n), \quad (1)$$

где w_k – вес, с которым измеренная точка k должна быть учтена в сумме, и $(m-n)$ – число степеней свободы. В случае линейной зависимости функций $Y_k(p_s)$ от параметров p_s требование миниму ма

$$\partial \chi^2 / \partial p_s = 0 \quad (2)$$

приводит к системе линейных уравнений, решение которой дает значения параметров p_s . Если эта зависимость нелинейная, то решение задачи нахождения наилучших приближений параметров p_s может быть достигнуто лишь итеративным путем [7-13]. С этой целью выбирают начальные приближения p_s^0 , затем нелинейную задачу аппроксимируют соответствующей линейной задачей, для чего $Y_k(p_s)$ разлагают в точке p_s^0 в ряд Тейлора и учитывают два первых члена ряда. Положив

$$Y_k(p_s) = Y_k(p_s^0) + \sum_{s=1}^n \frac{\partial Y_k(p_s^0)}{\partial p_s} \delta p_s \quad (3)$$

и подставляя (3) в (1), находим

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^m \frac{w_k}{m-n} [Y_k(p_s^0) + \sum_{s=1}^n \frac{\partial Y_k(p_s^0)}{\partial p_s} \delta p_s - N_k]^2, \quad (4)$$

где $\delta p_s = p_s - p_s^0$. Из требования минимума

$$\partial \chi^2 / \partial (\delta p_l) = 0 \quad (l = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

получим систему линейных уравнений, которую можно записать в векторном виде

$$A(\vec{p}^0) \delta \vec{p} = -B^*(\vec{p}^0), \quad (6)$$

решение этой системы уравнений дает наиболее вероятное значение поправки $\delta \vec{p}$, где \vec{p}^0 и $\delta \vec{p}$ — векторы-столбцы в вещественном n -мерном пространстве. Прибавляя найденные значения поправок $\delta \vec{p}$ к первоначальным приближениям \vec{p}^0 , получаем новые значения $\vec{p}^1 = \vec{p}^0 + \delta \vec{p}$. Этот процесс поиска решения продолжается до сходимости, т.е. решение находится итеративно по формуле

$$\vec{p}^{i+1} = \vec{p}^i - [A(\vec{p}^i)]^{-1} B^*(\vec{p}^i), \quad (7)$$

где i - номер итерации ($i = 0, 1, \dots, t$), \vec{p}^i - вектор-столбец с элементами $p_1^i, p_2^i, \dots, p_n^i$, $A(\vec{p}^i)$ - симметричная матрица с элементами

$$A_{\rho\ell} = \sum_{k=1}^m w_k \left(\frac{\partial Y_k(\vec{p}^i)}{\partial p_\rho} \right) \left(\frac{\partial Y_k(\vec{p}^i)}{\partial p_\ell} \right), \quad (8)$$

$\vec{B}(\vec{p}^i)$ - вектор-столбец с элементами

$$B_\ell = \sum_{k=1}^m w_k (Y_k(\vec{p}^i) - N_k) \left(\frac{\partial Y_k(\vec{p}^i)}{\partial p_\ell} \right). \quad (9)$$

Такой подход позволяет с помощью обращенной матрицы оценить одновременно погрешности величин параметров p . /7-9/. В отдельных случаях процесс поиска решения не приводит к сходимости, так как поправка $\delta \vec{p}^i = \vec{p}^{i+1} - \vec{p}^i$ выходит за пределы линейного диапазона. В этом случае одним из выходов из положения является сведение к минимуму функционала /16,17,18/

$$\phi^2 = \chi^2 + \lambda' (\delta \vec{p}^i)^T I' (\delta \vec{p}^i) / (m-n); \quad (10)$$

таким образом, поиск решения производится итеративно по формуле

$$\vec{p}^{i+1} = \vec{p}^i - [A(\vec{p}^i) + \lambda' I']^{-1} \vec{B}(\vec{p}^i) / 13, 16-16' / \quad (11)$$

где λ - постоянная, зависящая от номера итерации ($\lambda' > 0$), I - диагональная матрица [$I = \text{diag}(I_1, I_2, \dots, I_n)$; $I_1, I_2, \dots, I_n > 0$] и T - знак транспонирования. Если в качестве диагональных членов матрицы I взять соответствующие диагональные члены матрицы A /8,9,16,17/, то можно достигнуть быстрой сходимости функционала χ^2 /17/.

Следует отметить, что процесс поиска решения происходит тем быстрее, чем точнее заданы начальные приближения. Начальные приближения p^0 определяются с помощью осциллограмм со световым карандашом и алгоритмов.

3. Блок-схема системы

Блок-схема полуавтоматической системы для обработки спектров изображена на рис. 1. Регистрация спектров от полупроводниковых детекторов осуществляется стабилизированным спектрометрическим трактом с прецизионным преобразователем амплитуды импульсов в код, имеющим 4096 каналов ^{/8/} на аппаратуре центра накопления и обработки информации Лаборатории ядерных проблем ^{/20/}. В качестве измерительно-накопительного устройства используется анализатор АИ-4096. Для проведения непрерывной серии измерений предусмотрена автоматическая передача накопленной информации после окончания каждой экспозиции в буферное накопительное устройство, в качестве которого также используется анализатор АИ-4096. Режим измерений прерывается только на время передачи информации, которое составляет 0,2 сек. Установка экспозиции и программ измерения и передачи информации производится с помощью программного устройства.

Из буферного накопительного устройства информация может быть выведена на осциллограф со световым карандашом, а также на быстродействующее цифropечатающее устройство, графopостроитель, накопитель на магнитной ленте или же по двухсторонней кабельной связи передана на ЭВМ Минск-22.

Предварительная обработка информации производится в буферном накопительном устройстве с помощью осциллографа со световым карандашом и в ЭВМ Минск-22. Окончательная обработка информации осуществляется в ЭВМ СДС-1604А, куда информация из ЭВМ Минск-22 может быть передана по кабельной линии ^{/21/}, а также с помощью перфоленты и перфокарт. В дальнейшем для окончательной обработки информации наряду с ЭВМ СДС-1604А предполагается использовать ЭВМ БЭСМ-6.

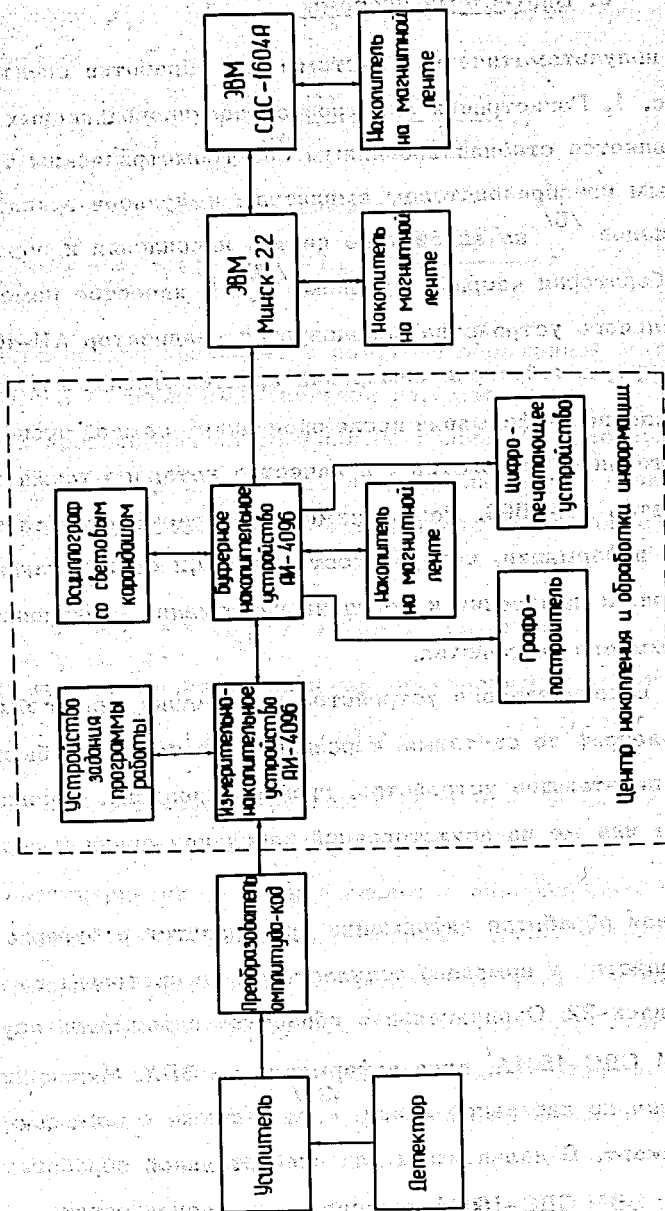


Рис. 1. Блок-схема полуавтоматической системы для обработки спектров от полупроводниковых детекторов.

4. Предварительная обработка спектров

При предварительной обработке спектров используется осциллограф со световым карандашом, имеющийся в буферном накопительном устройстве /22/. Наблюдение на экране осциллографа спектров, полученных в очередной экспозиции, можно проводить в течение времени, занимаемого следующей экспозицией. Отбор участков спектра, подлежащих дальнейшей обработке, производится с помощью разметки световым карандашом приблизительного положения максимумов пиков. Эта операция позволяет произвести сжатие информации и тем самым сократить время, затрачиваемое ЭВМ на обработку спектров.

Если в течение эксперимента не хватает времени для разметки спектра, то информация из буферного накопительного устройства переносится на магнитную ленту, а затем в удобное время снова вводится в него для проведения указанных выше операций.

Изображение содержимого каналов на экране осциллографа осуществляется в виде последовательности точек, расположение которых по оси ординат пропорционально числу импульсов, зарегистрированному в данном канале. Нанесение меток с помощью светового карандаша производится в последний, 18 разряд канала путем записи в него "1".

Отмеченные каналы изображаются на экране более яркими точками. Повышение яркости в отличие от других устройств достигается благодаря тому, что при проведении последовательного опроса всех каналов отмеченные каналы отображаются несколько раз подряд за один цикл развертки (выбрано $n = 10$), а остальные - только один раз; это позволило упростить конструкцию устройства /22/. Блок-схема программы работы осциллографа со световым карандашом, выполняемой, в основном, аппаратными методами, приведена на рис. 2.

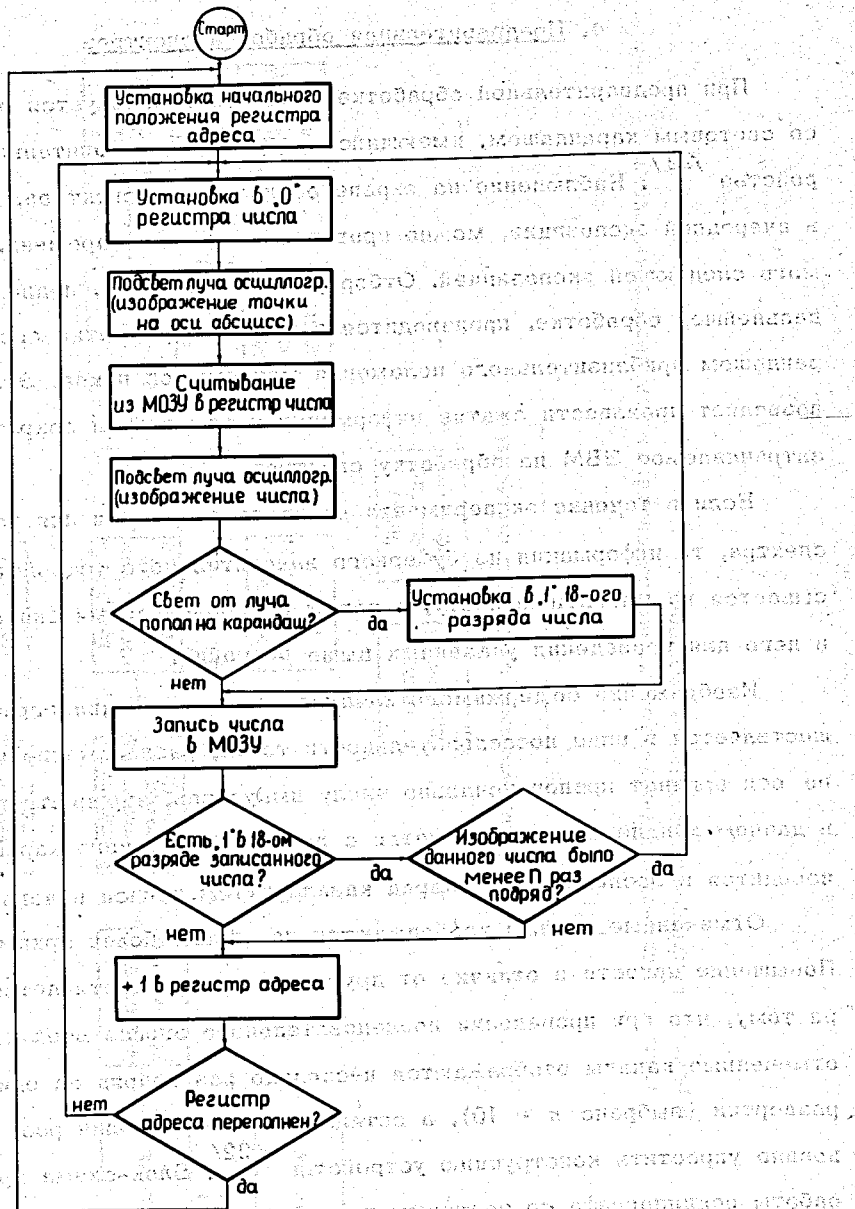


Рис. 2. Блок-схема программы работы осциллографа со световым карандашом.

После разметки спектров информация передается по кабельной линии связи в ЭВМ Минск-22 и записывается на магнитную ленту. На ЭВМ Минск-22 продолжается предварительная обработка, а именно, производится контроль информации и ее коррекция (например, исправляются ошибки, возникающие из-за разброса или выпадения точек). Информацию из ЭВМ можно выводить как в цифровом, так и в графическом виде.

Для окончательной математической обработки спектров, т.е. для определения значений энергий и относительных интенсивностей переходов информация передается на ЭВМ СДС-1604А. Основные программы для обработки гамма-спектров, спектров конверсионных электронов и бета-спектров описываются в следующих разделах.

5. Обработка гамма-спектров

Разрядка возбужденных энергетических уровней атомных ядер происходит в большинстве случаев путем испускания гамма-квантов, поэтому анализ гамма-спектров является одним из основных источников информации о квантовых характеристиках и структуре уровней ядра. Использование полупроводниковых детекторов, имеющих высокое энергетическое разрешение, позволяет получить точную информацию о переходах в довольно сложных гамма-спектрах. Важным шагом при этом является определение из зарегистрированных спектров с достаточной точностью энергии и относительной интенсивности гамма-переходов, необходимых для получения однозначных выводов о свойствах исследуемого ядра. Такой анализ гамма-спектров особенно важен при исследовании короткоживущих изотопов, находящихся далеко от полосы β -стабильности, так как в этом случае измерение других спектров, например, спектров конверсионных электронов высокоэнергетических переходов встречает большие экспериментальные трудности.

При разрядке возбужденных ядер часто возникают гамма-переходы с настолько близкими значениями энергии, что, несмотря на высокое энергетическое разрешение $Ge(Li)$ -детекторов пики не разделяются, т.е. возникают так называемые сложные пики. Поэтому одной из основных задач математического анализа гамма-спектров, наряду с определением энергии и относительной интенсивности одиночных линий, является разложение сложных пиков на отдельные компоненты и расчет характеристик каждой компоненты.

Полный анализ гамма-спектров при окончательной обработке производится с помощью программы "Гамма-Д1" на ЭВМ СДС 1604А. Блок-схема программы приведена на рис. 3. Программа написана на языке АЛГОЛ и представляет собой переработанный и измененный вариант программы "Гамма" /9/. В качестве математической модели для описания формы пика полного поглощения взята кривая Гаусса, так как в гамма-спектрах, полученных с помощью современных $Ge(Li)$ -спектрометров пики полного поглощения имеют довольно симметричную форму. Фоновая часть спектра в одиночном пике аппроксимируется полиномом 1-й степени, а при сложном пике - 2-й степени.

Для прецизионного анализа гамма-спектра с помощью заданных экспериментатором одиночных линий рассчитывается зависимость полуширины от номера канала, так как эта зависимость весьма чувствительно влияет на форму линии /9,11/. Рассчитываемая зависимость служит для определения полуширины всех остальных пиков спектра, поэтому в качестве одиночных пиков следует брать только четко выраженные пики, полученные с большой статистической точностью (за исключением аннигиляционного пика с энергией 511 кэВ, который уширен вследствие эффекта Доплера /9,23/). Исходя из заданных при предварительной обработке приблизительных положений пиков и рассчитанной зависимости полуширины пика от канала, программа разделяет

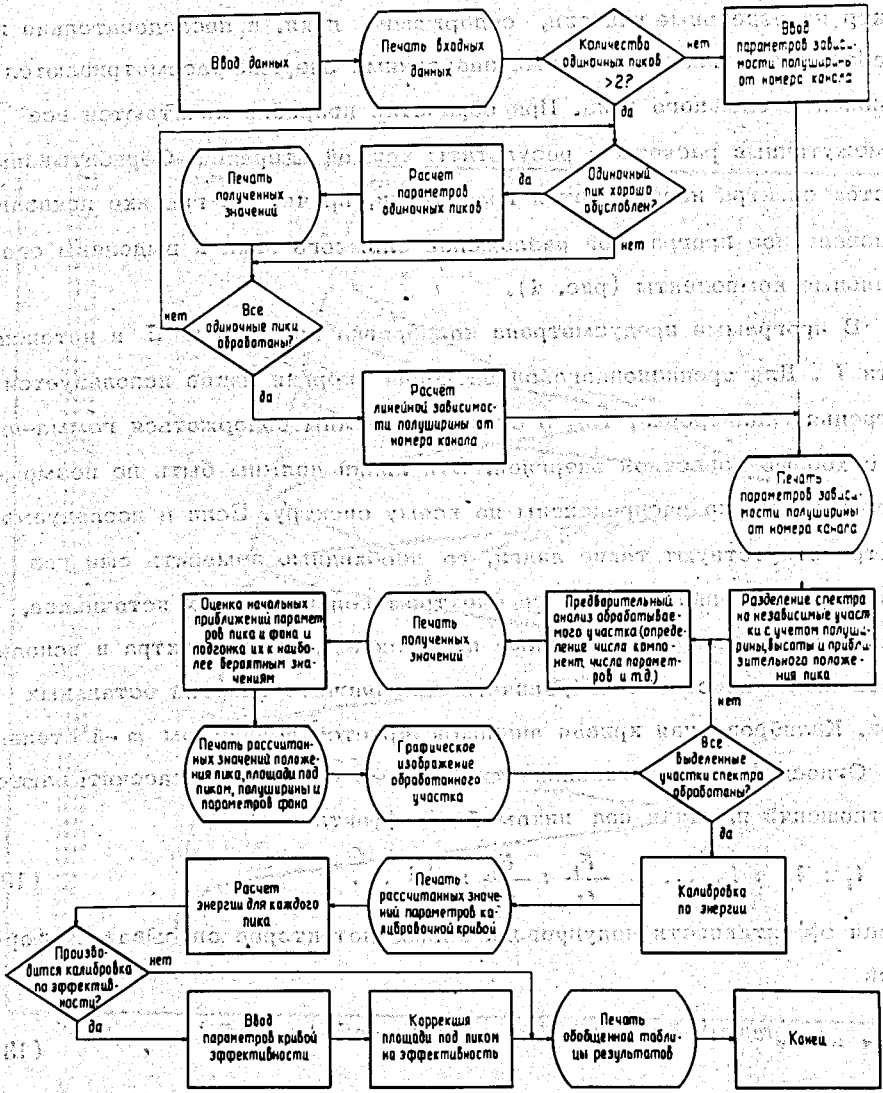


Рис. 3. Блок-схема программы "Гамма Д1".

спектр на отдельные участки, содержащие пики, и последовательно их обрабатывает. Пики с близкими значениями энергии рассматриваются как компоненты сложного пика. При обработке подробно печатаются все промежуточные расчеты и результаты каждой итерации. Обрабатываемый участок спектра изображается графически, причем на графике показано произведенное программой разложение сложного пика и выделены его отдельные компоненты (рис. 4).

В программе предусмотрена калибровка по энергии E и интенсивности I . Для прецизионного определения энергии пиков используется внутренняя калибровка, т.е. в спектрах должны содержаться гамма-линии с хорошо известной энергией. Эти линии должны быть по возможности равномерно распределены по всему спектру. Если в исследуемом спектре отсутствуют такие линии, то необходимо измерить еще раз данный спектр одновременно со спектром калибровочных источников, прокалибровать наиболее сильные пики исследуемого спектра и использовать их в качестве калибровочных при расчете энергий остальных пиков. Калибровочная кривая аппроксимируется полиномом m -й степени.

Относительные интенсивности I гамма-переходов рассчитываются из отношений площади под пиком F к эффективности ϵ

$$I_1 : I_2 : I_3 \dots = \frac{F_1}{\epsilon_1} : \frac{F_2}{\epsilon_2} : \frac{F_3}{\epsilon_3} \dots \quad (12)$$

Кривая эффективности полупроводниковых детекторов описывается формулой

$$\epsilon = a e^{p_0 + p_1 \ln E + p_2 (\ln E)^2} + b e^{q_0 + q_1 \ln E + q_2 (\ln E)^2}, \quad (13)$$

где

$$a = \begin{cases} 1 & E \leq E_0 \\ 0 & E > E_0 \end{cases} \quad b = \begin{cases} 0 & E \leq E_0 \\ 1 & E > E_0 \end{cases} \quad (13)$$

...иногда в спектре наблюдается эффект ...
 ...иногда в спектре наблюдается эффект ...
 ...иногда в спектре наблюдается эффект ...

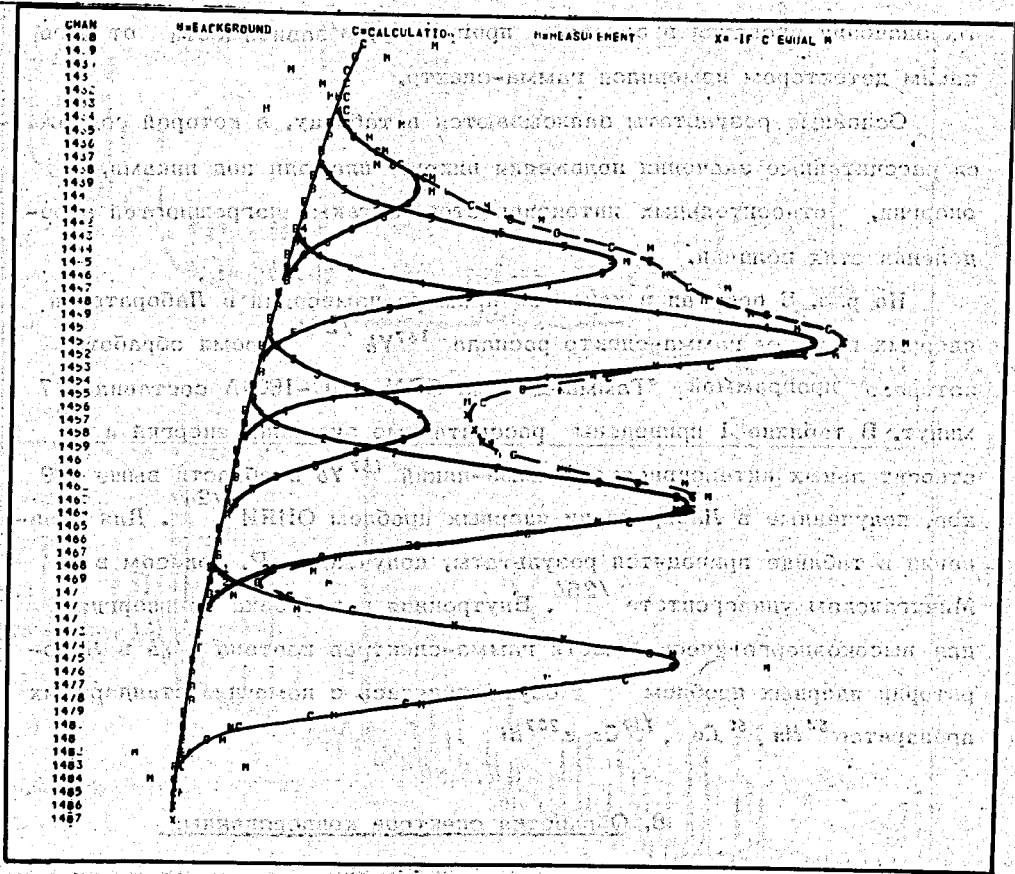


Рис. 4. Пример графического изображения участка гамма-спектра после его обработки программой "Гамма Д1".

E_0 – постоянная, которая разделяет кривую эффективности на низко- и высокоэнергетическую части.

Параметры кривой эффективности рассчитываются с помощью специальной программы. Эти параметры постоянны для каждого детектора. Их значения вводятся в основную программу, в зависимости от того, каким детектором измерялся гамма-спектр.

Основные результаты записываются в таблицу, в которой содержатся рассчитанные значения положения пиков, площади под пиками, энергии, относительных интенсивностей, а также погрешностей определения этих величин.

На рис. 5 показан в качестве примера измерений в Лаборатории ядерных проблем гамма-спектр распада $^{167}\text{Yb}^{/24/}$, время обработки которого программой "Гамма-Д1" на ЭВМ СДС-1604А составило 17 минут. В таблице 1 приведены рассчитанные значения энергий и относительных интенсивностей гамма-линий ^{167}Yb в области выше 500 кэВ, полученные в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ $^{/24/}$. Для сравнения в таблице приводятся результаты, полученные Р. Голесом в Мичиганском университете $^{/25/}$. Внутренняя калибровка по энергиям для высокоэнергетической части гамма-спектров изотопа ^{167}Yb в Лаборатории ядерных проблем осуществлялась с помощью стандартных препаратов ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{207}Bi .

6. Обработка спектров конверсионных электронов

Изучение спектров конверсионных электронов является одним из наиболее эффективных методов определения мультипольности гамма-переходов и квантовых характеристик основных и возбужденных состояний ядер. При исследовании спектра конверсионных электронов короткоживу-

Таблица I. Расчетные значения энергии и относительных интенсивностей γ -переходов распада ^{167}Yb
с $E_{\gamma} > 500$ кэВ

Мичиганский университет (Р.Голес/25/)		Лаборатория ядерных проблем ОЯЯИ/24/			
E_{γ} , кэВ		E_{γ} , кэВ		I_{γ}	
1		2		3	
541.5	+ 0.3	541.4	+ 0.2	2.2	+ 0.6
547.6	+ 0.2	547.5	+ 0.1	6.1	+ 1.0
	-	561.8	+ 0.4	1.4	+ 0.5
	-	571.3	+ 0.2	3.2	+ 0.7
	-	590.9	+ 0.4	2.3	+ 0.8
	-	600.2	+ 0.4	2.0	+ 0.6
665.1	+ 0.5	664.9	+ 0.2	4.4	+ 1.2
672.1	+ 0.3	672.1	+ 0.2	3.9	+ 1.0
680.4	+ 0.3	680.3	+ 0.5	2.1	+ 0.7
687.1	+ 0.2	686.9	+ 0.5	2.6	+ 1.3
688.6	+ 0.4	688.5	+ 0.2	5.7	+ 1.6
694.1	+ 0.4	694.5	+ 0.6	2.0	+ 1.3
697.3	+ 0.4	697.1	+ 0.6	2.0	+ 1.4
707.7	+ 0.4	707.7	+ 0.4	1.6	+ 0.9
719.7	+ 0.4	719.5	+ 0.3	1.9	+ 0.6
733.1	+ 0.3	733.2	+ 0.3	3.4	+ 1.0
791.6	+ 0.2	791.5	+ 0.2	6.3	+ 1.2
829.3	+ 0.2	829.4	+ 0.3	3.4	+ 0.9
846.2	+ 0.2	846.1	+ 0.2	6.5	+ 1.2
903.3	+ 0.3	903.3	+ 0.2	3.3	+ 0.9
920.29	+ 0.1	920.3	+ 0.08	57.0	+ 8.6
923.5	+ 0.3	923.7	+ 0.4	3.0	+ 1.2
	-	927.1	+ 0.3	2.0	+ 0.9
933.5	+ 0.3	933.8	+ 0.3	2.6	+ 1.0
936.4	+ 0.3	936.7	+ 0.3	3.5	+ 1.1
	-	977.9	+ 0.3	2.1	+ 0.7
998.4	+ 0.1	998.3	+ 0.3	2.1	+ 0.7
1009.0	+ 0.2	1008.6	+ 0.3	1.8	+ 0.7
1022.8	+ 0.2	1022.9	+ 0.2	5.3	+ 1.0
1026.2	+ 0.2	1025.9	+ 0.3	2.2	+ 0.8
1037.02	+ 0.1	1037.07	+ 0.07	300.0	+ 35.0
1048.7	+ 0.2	1048.5	+ 0.3	6.0	+ 3.0
1050.4	+ 0.2	1050.3	+ 0.2	19.0	+ 4.5
1067.6	+ 0.3	1068.2	+ 0.4	3.4	+ 1.3
1069.5	+ 0.3	1070.3	+ 0.6	1.7	+ 1.0
1110.3	+ 0.2	1110.3	+ 0.1	5.2	+ 1.0
1139.6	+ 0.2	1139.5	+ 0.1	19.3	+ 2.7
	-	1165.5	+ 0.4	1.5	+ 0.6
1213.2	+ 0.1	1213.3	+ 0.2	3.0	+ 1.0
1217.1	+ 0.1	1217.1	+ 0.2	3.3	+ 1.0
1234.64	+ 0.1	1234.63	+ 0.07	77.0	+ 9.0
1241.9	+ 0.1	1242.0	+ 0.1	8.1	+ 1.4
	-	1254.5	+ 0.4	1.3	+ 0.5

1			2			3		
1288.0	+	0.1	1288.1	+	0.1	16.8	+	2.4
1304.8	+	0.2	1304.9	+	0.1	16.0	+	2.4
1306.8	+	0.2	1320.9	+	0.1	6.1	+	1.0
1332.8	+	0.1	1332.5	+	0.2	2.7	+	0.7
1336.7	+	0.3	1337.2	+	0.5	1.4	+	0.7
1339.9	+	0.3	1340.1	+	0.4	2.0	+	0.7
1342.3	+	0.3	1342.4	+	0.4	1.9	+	0.7
1361.5	+	0.2	1361.5	+	0.1	9.0	+	1.7
1365.5	+	0.5	1366.5	+	0.7	1.5	+	0.6
1369.8	+	0.1	1370.2	+	0.1	5.8	+	1.1
1385.1	+	0.2	1384.8	+	0.2	4.1	+	0.9
1393.1	+	0.2	1393.1	+	0.2	3.0	+	0.6
1401.9	+	0.3	1401.9	+	0.3	1.4	+	0.5
1410.4	+	0.3	1410.7	+	0.4	1.5	+	0.5
1427.7	+	0.2	1427.8	+	0.3	1.5	+	0.5
1433.5	+	0.4	1433.7	+	0.3	1.4	+	0.5
1438.4	+	0.1	1438.3	+	0.1	10.7	+	1.6
1455.1	+	0.1	1455.1	+	0.1	11.0	+	1.6
1464.7	+	0.3	1464.8	+	0.2	2.9	+	0.6
1481.0	+	0.3	1481.1	+	0.3	1.2	+	0.5
1487.6	+	0.1	1487.4	+	0.2	4.3	+	1.0
1498.1	+	0.2	1498.2	+	0.3	2.0	+	0.6
1511.9	+	0.1	1511.9	+	0.2	6.4	+	1.0
1516.7	+	0.3	1517.0	+	0.2	4.2	+	0.8
1525.5	+	0.2	1525.7	+	0.3	1.0	+	0.3
1533.5	+	0.2	1533.1	+	0.4	0.8	+	0.3
1537.6	+	0.2	1537.5	+	0.4	1.5	+	0.7
	-		1542.0	+	0.5	0.5	+	0.3
	+		1549.5	+	0.4	0.6	+	0.3
1570.5	+	0.1	1570.4	+	0.2	14.0	+	2.1
1587.2	+	0.1	1587.1	+	0.2	13.6	+	1.8
1619.0	+	0.3	1619.2	+	0.2	5.6	+	0.8
1631.8	+	0.2	1631.7	+	0.3	0.7	+	0.3
1643.3	+	0.3	1643.8	+	0.2	7.2	+	0.9
1644.2	+	0.3	1675.0	+	0.7	0.3	+	0.2
	-		1680.7	+	0.6	0.5	+	0.3
	-		1693.6	+	0.5	0.4	+	0.2
	-		1793.4	+	0.6	0.3	+	0.2
	-		1807.8	+	0.5	0.6	+	0.3

ших изотопов необходимо использовать многоканальные спектрометры с большой светосилой и высоким разрешением, как например, $Si(Li)$ - спектрометр. На рис. 6 приведен один из спектров конверсионных электронов, измеренный $Si(Li)$ -спектрометром с препаратом ^{133}Pr , полученным на масс-сепараторе /4,5/. Как видно, форма линий довольно симметричная, что позволяет производить обработку спектров конверсионных электронов, как и гамма-спектров, с помощью программы "Гамма-Д1".

Во многих случаях можно получить препараты короткоживущих изотопов с достаточно большими активностями, позволяющими исследовать тонкую структуру спектров конверсионных электронов с помощью бета-спектрографов с высоким энергетическим разрешением /24,26-28/, т.е. исследовать линии конверсионных электронов для оболочек K , L , L_{II} , L_{III} , M_I , M_{II} , M_{III} и т.д.

Определение энергии гамма-переходов, являющееся одной из самых трудоемких задач, в этих случаях производится исходя из значений энергии линий конверсионных электронов для различных оболочек с помощью программы "Конверс", блок-схема которой приведена на рис. 7.

7. Обработка бета-спектров

Изучение спектров бета-частиц разрешенных переходов, полученных методом совпадений с гамма-квантами ядерных переходов, является одним из основных способов определения энергий распада короткоживущих изотопов. Так как энергия уровня, на который направлен разрешенный бета-переход, известна с большой точностью (с точностью определения энергии гамма-переходов), то необходимо по возможности с такой же точностью определить граничную энергию бета-спектра w_0 .

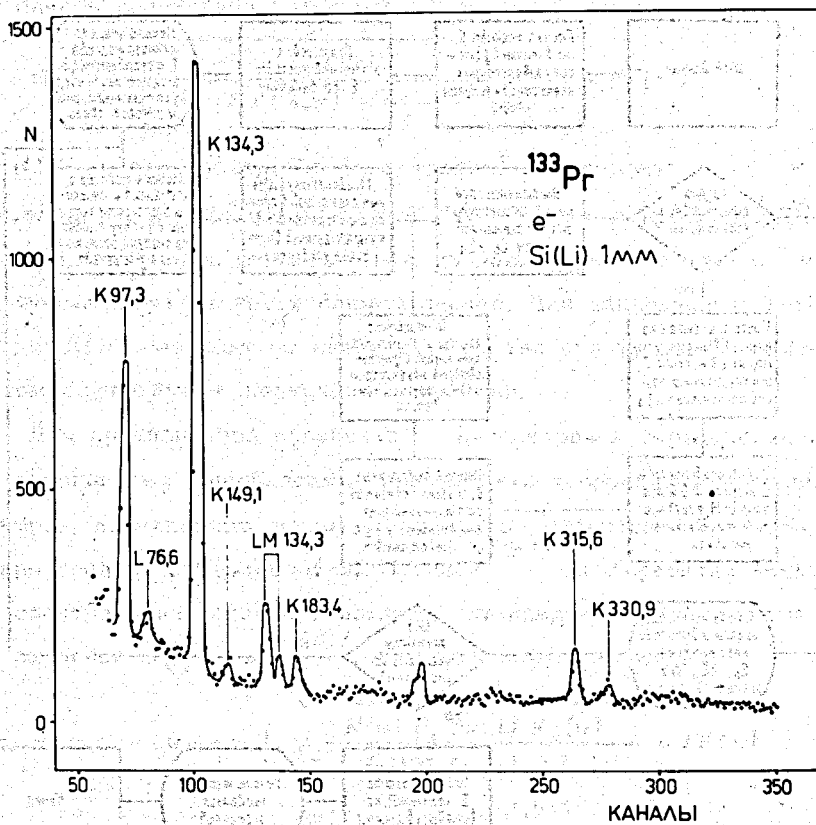


Рис. 6. Спектр конверсионных электронов масс-сепарированного изотопа ^{133}Pr , измеренный Si(Li) -детектором.

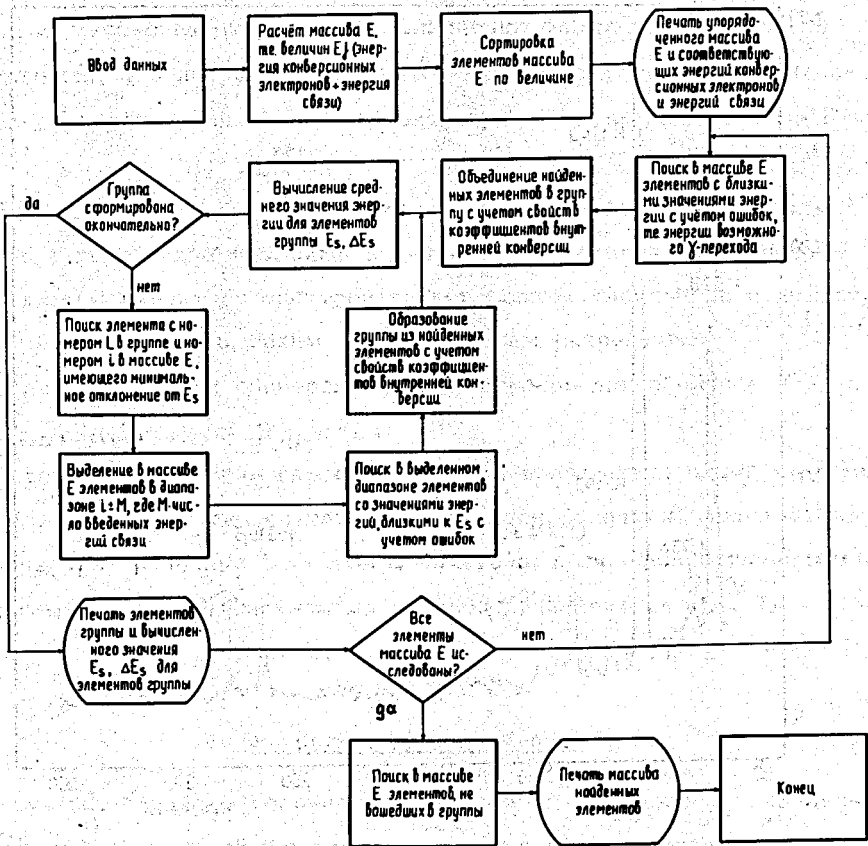


Рис. 7. Блок-схема программы "Конверс".

Граничную энергию бета-спектра w_0 , или, иначе говоря, максимальную энергию позитрона (электрона) w_0 , в спектрометрической практике находят из функции Ферми-Кюри $FK(w)$. Для этой цели энергетический спектр позитронов (электронов) представляется в виде

$$w_0 - w = \sqrt{\frac{N(w)}{K(w) F(w, z) w(w^2 - 1)^{1/2}}} = FK(w), \quad (14)$$

где $N(w)$ — число позитронов (электронов) в интервале w , $w + dw$, $F(w, z)$ — функция Ферми и $K(w)$ — формфактор бета-перехода. Для разрешенных переходов функция $K(w)$ не зависит от энергии w и функция Ферми-Кюри является прямой линией. Для запрещенных переходов функция $K(w)$ зависит от энергии w , так что функция Ферми-Кюри в этом случае имеет нелинейный характер.

Для прецизионной обработки бета-спектров и определения граничной энергии w_0 необходимо производить коррекцию искажений формы спектров, возникающих из-за аппаратурных эффектов, обратного рассеяния позитронов (электронов) и т.д. /29-31/. Коррекция искажений β -спектра производится с помощью стандартного источника с граничной энергией $w_{0s} > w_0$ /30/, т.е. определяется функция

$$w_0 - w = (w_{0s} - w) \sqrt{\frac{N(w) F_s(w, z) K_s(w)}{n_s(w) F(w, z) K(w)}} = FK(w), \quad (15)$$

где индекс s характеризует соответствующие величины β -спектра стандартного источника. Обработка β -спектров, измеренных на $Si(Li)$ детекторах, производится программой "Бета" ($K(w) = const$).

С помощью данной программы рассчитывается коррекция искажений спектра, функция Ферми - Кюри, производится

графическое изображение функции Ферми-Кюри, а также рассчитывается методом наименьших квадратов граничная энергия w_0 и ее погрешность Δw_0 . Блок-схема программы "Бета" приведена на рис. 8.

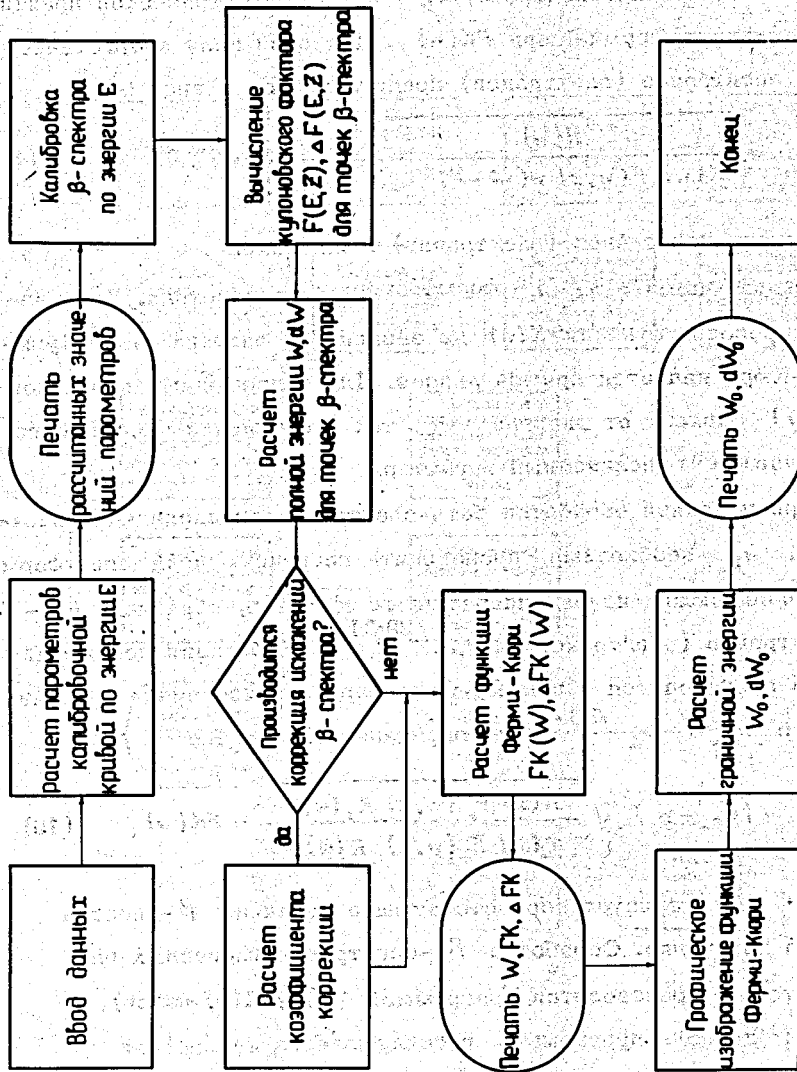


Рис. 8. Блок-схема программы "Бета".

8. Заключение

Применение описанной полуавтоматической системы для обработки спектров от полупроводниковых детекторов позволило значительно сократить время, затрачиваемое ранее на их обработку вручную; повысилась точность и надежность расчетов основных величин. Экспериментатор теперь имеет возможность получать в короткий срок после измерения всю спектрометрическую информацию, необходимую для физической интерпретации результатов.

В течение последнего года с помощью полуавтоматической системы были получены данные о распаде следующих нейтронодефицитных изотопов ^{179}Re , ^{167}Yb , $^{124}/^{165}\text{Tm}$, ^{162}Yb , ^{162}Im , ^{160}Im , ^{159}Im , ^{135}Nd , ^{135}Pr , ^{134}Nd , ^{134}Pr и ^{133}Pr /32,33/.

В заключение авторы благодарят К.Я. Громова за постоянную поддержку и интерес к работе.

Литература

1. Г. Музиоль. Препринт ОИЯИ, Б2-6-6825, Дубна, 1969.
2. I. Bergstrom. Nucl. Instr. and Meth., 43 (1966) 116.
3. R.A. Sorenson. CERN 70-30, 1 (1970) 1.
4. Г. Музиоль, В.И. Райко, Х. Тыррофф. Препринт ОИЯИ, Р6-4487, Дубна, 1969.
5. Г. Байер, А. Пиотровски, В.И. Райко, Х. Тыррофф, Э. Херрманн. Препринт ОИЯИ, Р6-5761, Дубна, 1971.
6. Р. Арльт, С. Кадыкова, А. Калинин, В. Моисеева, Г. Музиоль, М. Омеляненко, Ю. Прокофьев, Б. Семенов, А. Синаев, Н. Чистов, Х. Штрусный, Г. Эльснер. Препринт ОИЯИ, Р6-3773, Дубна, 1968.
7. R.G. Helmer, R.L. Heath, M. Putham, D.H. Gipson. Nucl. Instr. and Meth., 57 (1967) 47.
8. V. Barnes. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-15 (1968) 437.

9. G. Winter. ZfK - 182, Rossendorf 1969.
10. J.T. Routti, S.G. Prussin. Nucl.Instr. and Meth., 72 (1969) 125.
11. V. Naase. KFK-730, Karlsruhe 1968.
12. Э. Рупп. Препринт ОИЯИ, Р10-5776, Дубна, 1971.
13. В. Гаджоков. Препринт ОИЯИ, Р10-5035, Дубна, 1970.
14. Ф. Дуда, З. Зайдлер, И. Томик, В.Р. Трубников, Ю.В. Тутышкин, М.И. Фоминых, В.М. Цупко-Ситников. Препринт ОИЯИ, 10-4977, Дубна, 1970.
15. В.С. Александров, Ф. Дуда, О.И. Елизаров, Г.П. Жуков, Г.И. Забиякин, З. Зайдлер, Е.Т. Кондрат, З.В. Лысенко, В.И. Приходько, В.Г. Тишин, В.И. Фоминых, М.И. Фоминых, В.М. Цупко-Ситников, Изв. АН СССР, сер. физ., 34 (1970) 89.
16. K. Levenberg. Quart. Appl. Math., 2 (1944) 164.
17. J. Meiron. J.Opt.Am., 55 (1965) 1105.
18. O.P. Feder. Applied Optics 2 (1963) 1209.
19. Л. Александров. Препринт ОИЯИ, Р5-5136, Дубна, 1970.
20. С.В. Медведь, В.В. Моисеева, А.Н. Силаев, Г.Ю. Шахер, Н.А.Чистов. ПТЭ 4 (1970) 109.
21. Н.Н. Говорун, А.И. Ефимова, И.М. Иванченко, А.А. Карлов, З.В. Лысенко. Препринт ОИЯИ, 11-4386, Дубна, 1969.
22. С.В. Медведь, В.В. Моисеева, Г.Ю. Шахер, Х. Хаупт. Препринт ОИЯИ, 10-5929, Дубна, 1971.
23. H.P. Hotz, J.M. Mathiesen, J.P. Hurley. Phys.Rev., 170 (1968) 351.
24. L.Funke, K.H.Kaun, P.Kemnitz, H. Sodan, G. Winter, A. Arlt, K.Ya. Gromov, S.M. Kamolchodjaev, A.F. Novgorodov, H. Strusny, D.De Frenne, E. Jacobs. Nucl.Phys., A175 (1971) 101.
25. R. Goles. Michigan State University, Nuclear Chemistry Annual Report 1969, page 79.
26. А.А. Абдумаликов, А.А. Абдуразаков, К.Я. Громов, Т.И. Исламов, Х. Штрусный. Препринт ОИЯИ, 6-4393, Дубна, 1969.
27. В. Harmatz, T.H. Handley. Nucl.Phys., A121 (1968) 481.

28. А.А. Абдуразаков, К.Я. Громов, В. Звольска, Т.А. Исламов, Х. Штрусный. Изв. АН СССР, 35 (1971) 698.
29. E. Jacobs, L. Dorikens-Vanpraet, J. Demuynck, D. De Frenne. Nucl. Instr. and Meth., 47 (1967) 55.
30. P. Charoenkwan. Nucl. Instr. and Meth., 34 (1965) 93.
31. J.B. Willett, E.H. Spejewski. Nucl. Instr. and Meth., 52 (1967) 77.
32. Тезисы докладов XII совещания по ядерной спектроскопии нейтронодефицитных изотопов и теории деформированных ядер. Дубна, 22-25 июня 1971. Препринт ОИЯИ Д6-5783,
33. Программа и тезисы докладов XXII ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Киев, 25-28 января 1972 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 января 1972 года.