

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



25/xu 78

1 - 11845

A-391

5638/2-78

Ю.К.Акимов, М.Г.Горнов, Ю.Б.Гуров, Г.А.Крыканова,
П.В.Морохов, К.О.Оганесян, Б.П.Осипенко,
В.А.Печкуров, А.П.Пичугин, А.К.Поносов,
С.Ю.Пороховой, Ф.М.Сергеев

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
С ПОМОЩЬЮ СЛОИСТОГО
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СПЕКТРОМЕТРА

1978

1 - 11845

Ю.К.Акимов, М.Г.Горнов,* Ю.Б.Гуров,* Г.А.Крыканова,*
П.В.Морохов,* К.О.Оганесян, Б.П.Осипенко,
В.А.Печкуров,* А.П.Пичугин,* А.К.Поносов,*
С.Ю.Пороховой, Ф.М.Сергеев*

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
С ПОМОЩЬЮ СЛОИСТОГО
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СПЕКТРОМЕТРА

Направлено в ПТЭ



* Московский инженерно-физический институт

Акимов Ю.К. и др.

1 - 11845

О возможностях измерения энергии заряженных частиц с помощью слоистого полупроводникового спектрометра

Проанализированы возможности измерения энергии ионизирующих частиц с помощью стопок полупроводниковых детекторов (ППД) в режиме "Напролет". Показано, что с помощью стопок ППД можно измерять энергию частиц в этом режиме с точностью $\sim 0,5$ МэВ в широком интервале энергий. Предлагается использовать "пролетный" режим измерения энергии для спектрометрии отрицательных пионов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Akimov Yu.K. et al.

1 - 11845

About Possibilities of Energy Measurements of Charged Particles by Means of Multilayer Semiconductor Spectrometer

The possibility of measurements of ionization particles by means of semiconductor detector (SCD) stack in "flight" regime have been analyzed. The particle energy measurements accuracy is shown to be of $\sim 0,5$ MeV in a wide energy range. The "flight" regime of energy measurements is suggested to be used in negative pion spectrometry.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения широкого класса физических задач, связанных с исследованиями на пучках пионов и протонов низких энергий, в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ создается установка "Пион". В качестве одной из ее детектирующих систем используются полупроводниковые спектрометры.

Настоящая работа является результатом первого этапа исследований, связанных с разработкой полупроводникового спектрометра заряженных частиц с энергией до ~ 100 МэВ. Главной особенностью разрабатываемого спектрометра является высокое энергетическое разрешение $\sim 0,5$ МэВ/ в широком диапазоне энергий для различных частиц, в том числе отрицательных пионов.

Обычно высокого энергетического разрешения достигают либо с помощью магнитных спектрометров, либо с помощью ППД, работающих в режиме полного поглощения. Однако для магнитных спектрометров требование высокого энергетического разрешения трудно совместить с условием широкого интервала измеряемых энергий, а режим полного поглощения ППД оказывается непригодным для спектрометрии отрицательных пионов.

В то же время, если спектрометр на основе ППД изготавливать слоистым, то можно совместить высокие спектрометрические свойства ППД при работе на полное поглощение для стабильных частиц с возможностью измерять энергию отрицательных пионов в режиме "Напролет". Отрицательный пион, пройдя определенное количество слоев, останавливается в одном из ППД.

В результате ядерного захвата энергосвечение в детекторе, где произошла остановка, становится неопределенным, вследствие чего измерение энергии в режиме на полное поглощение невозможно. Отбросив показания последнего детектора, энергию пиона можно определить по набору потерь энергии в предшествующих детекторах, то есть в режиме "Напролет". В этом случае величина энергетического разрешения в основном определяется толщиной слоев ППД, которая, в свою очередь, связана с частью пробега пиона до остановки, отбрасываемой при восстановлении энергии частицы.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦЫ ПО ПОТЕРЯМ ЭНЕРГИИ В СЛОЯХ

Наиболее полная информация о потерях энергии учитывается в методе максимального правдоподобия /ММП/. Функция правдоподобия для набора потерь энергии в слоях записывается следующим образом:

$$f(E, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n) = f_1(E, \Delta_1) f_2(E - \Delta_1, \Delta_2) \dots f_n(E - \sum_1^{n-1} \Delta_i, \Delta_n), \quad /1/$$

где E - начальная энергия частицы $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ - потеря энергии, f_1, f_2, \dots, f_n - функции распределения потерь энергии в слоях.

В реальном случае ППД имеет кроме чувствительной и нечувствительную область, так называемый "мертвый слой". Корректная запись функции правдоподобия для такого случая содержит интегралы возрастающей кратности, что делает практически невозможным использование данного метода с помощью современных ЭВМ. Однако для ППД с толщиной "мертвого слоя", много меньшей толщины чувствительной области, можно воспользоваться приближенным выражением для функции максимального правдоподобия:

$$f(E, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n) = f_1(E, \Delta_1) f_2(E - (\Delta_1 + \bar{\Delta}_{M1}), \Delta_2) \dots f_n(E - \sum_1^{n-1} (\Delta_i + \bar{\Delta}_{Mi}), \Delta_n), \quad /1a/$$

где $\bar{\Delta}_{M1}, \bar{\Delta}_{M2}, \dots, \bar{\Delta}_{Mn}$ - средние потери энергии в "мертвых слоях" ППД.

Процедура нахождения максимумов функций /1/, /1a/ для большого количества слоев занимает значительное время работы ЭВМ. Поэтому имеет смысл проанализировать другие, более простые возможности, например, определить энергию частицы - E_n на входе в последний "пролетный" детектор, используя зависимость среднего сброса энергии в детекторе от энергии частицы. Переход к начальной энергии частицы можно осуществить двумя способами:

1. С помощью суммирования энергии E_n с показаниями предыдущих (n-1) детекторов

$$E = E_n (\Delta_n) + \sum_1^{n-1} (\Delta_i + \bar{\Delta}_{Mi}), \quad /2/$$

2. Либо, зная суммарную толщину первых (n-1) детекторов - R_{n-1} , воспользоваться пробегной кривой. В этом случае -

$$E = E(R_{n-1} + R(E_n(\Delta_n))), \quad /3/$$

Так как экспериментальная проверка расчетного разрешения для пионов осложнена ввиду низкой интенсивности пучков, значительной примеси мюонов и малых размеров обычно изготавливаемых ППД, расчеты и калибровочные облучения на модели спектрометра были выполнены в пучках протонов.

3. АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

С целью определения зависимости энергетического разрешения слоистого спектрометра от энергии частиц, толщин ППД и их количества были выполнены расчеты по моделированию потерь энергии протонами в слоистых структурах. Розыгрыш потерь энергии в слоях проводился согласно распределениям вероятностей, изложенным в работе /1/. Средние потери энергии и пробеги

протонов в кремнии рассчитывались с использованием формул и констант из работ ^{/2-5/}. Входная энергия протонов восстанавливалась с помощью методов ^{/1-3/} по разыгранным наборам потерь энергии в "пролетном" режиме, то есть без учета сброса энергии в последнем слое.

На *рис. 1* представлены расчетные зависимости энергетического разрешения стопки кремниевых ППД от количества слоев для идеального случая, когда толщины "мертвых слоев" равны нулю. Полная толщина стопки ППД равна 12 мм.

Видно, что при большой величине остаточного пробега /для протонов с энергией, равной 100 МэВ/ *рис. 1а*/, остаточный пробег равен 29,64 мм/энергетическое разрешение, полученное с помощью метода максимального правдоподобия ^{/1/}, практически не зависит от числа слоев, то есть в случае отсутствия корреляций между сбросами энергии в слоях увеличение количества отсчетов компенсируется ухудшением точности. Разрешение, полученное с помощью суммирования потерь ^{/2/}, с помощью пробежного метода ^{/3/} ухудшается при уменьшении толщины детекторов.

С уменьшением величины остаточного пробега /для протонов с энергией 55 МэВ/ *рис. 1б*/ остаточный пробег равен 2,41 мм/ разрешение улучшается, причем вследствие значительной корреляции потерь энергии в последних слоях появляется зависимость величины энергетического разрешения, полученного методом максимального правдоподобия, от количества слоев, то есть появляется выигрыш в точности при увеличении количества отсчетов. В рассмотренном случае увеличение количества детекторов с одного до пяти приводит к выигрышу в разрешении ~25%. Дальнейшее увеличение количества слоев не приводит к улучшению разрешения. В этой области энергии и остаточных пробегов разрешение с помощью пробежного метода ^{/3/} незначительно уступает разрешению ММП ^{/1/} и им можно воспользоваться для значительного сокращения времени расчетов на ЭВМ.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что для области энергий, соответствующей пробегам

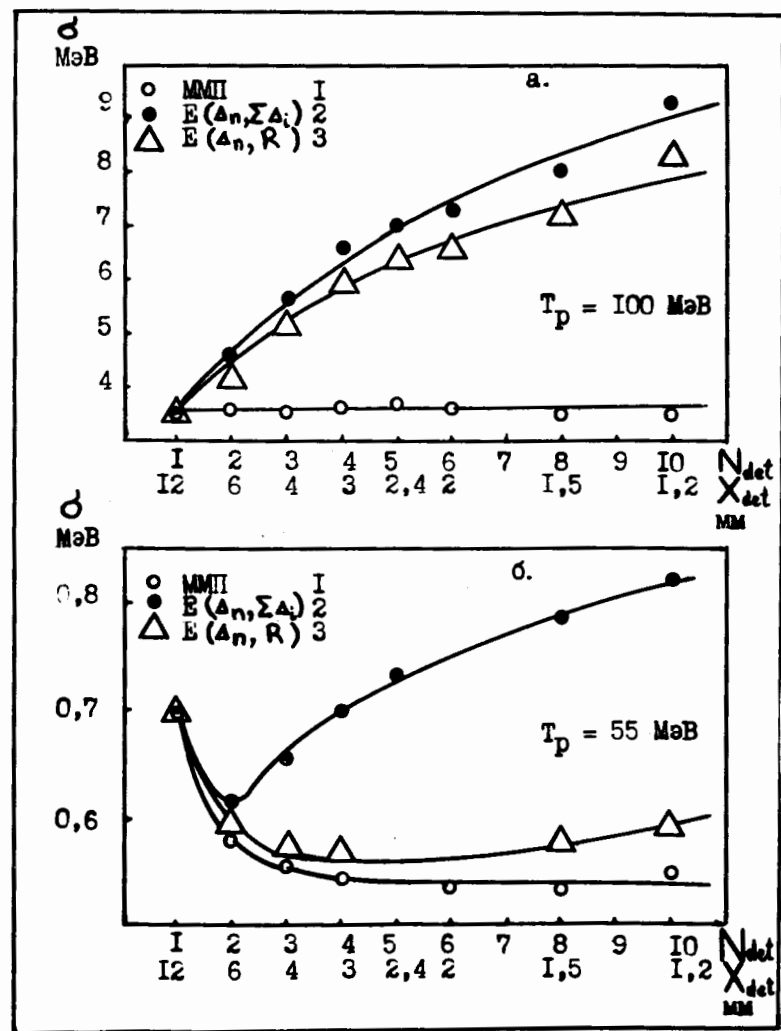


Рис. 1. Расчетные зависимости энергетического разрешения стопки кремниевых ППД от количества и толщины детекторов. Полная толщина стопки 12 мм. N_{det} - количество детекторов, X_{det} - толщина детекторов. 1 - метод максимального правдоподобия, 2 - метод суммирования амплитуд, 3 - пробежный метод. а/ $T_p = 100$ МэВ, б/ $T_p = 55$ МэВ.

частиц, большим полной толщины стопки детекторов, разрешение, в основном, зависит от энергии частицы и слабо зависит от количества ППД в стопке. Совершенно иная ситуация для области энергий, соответствующей пробегам частиц, меньшим полной толщины стопки. В этом случае остаточный пробег в зависимости от энергии частиц осциллирует с периодом, равным толщине ППД. Средний остаточный пробег для равномерного распределения частиц по энергии остается практически постоянным и равным половине толщины ППД в стопке. В соответствии с изменением остаточного пробега должно изменяться и энергетическое разрешение.

На рис. 2 представлена расчетная зависимость от энергии протонов /ММП/ энергетического разрешения стопки ППД с толщинами, равными 3 мм. Разрешение рассчитывалось в точках, соответствующих остаточным пробегам, равным 0,3; 1,5; 2,7 мм. Видно, что разрешение периодически изменяется от ~200 до ~600 кэВ, причем среднее значение разрешения с увеличением энергии выходит на плато, составляя величину 400 кэВ. Возможности других методов обработки для среднего разрешения по сравнению с ММП представлены на рис.3.

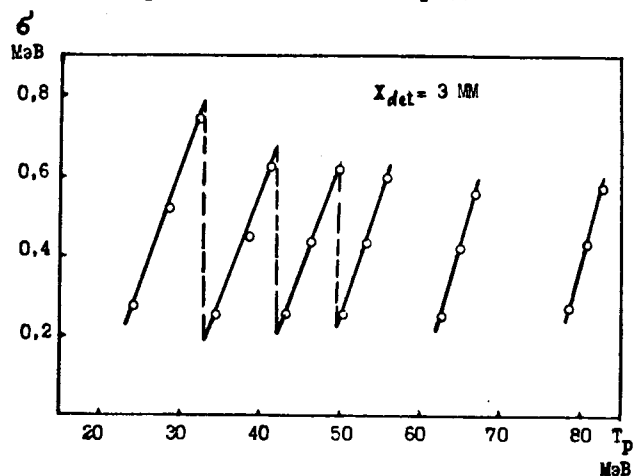


Рис. 2. Расчетная зависимость энергетического разрешения стопки кремниевых ППД. Толщина детекторов 3 мм, ММП.

Видно, что метод суммирования потерь /2/ также приводит к практически постоянному разрешению при росте энергии частицы. Этот результат понятен, так как разрешение в данном случае в основном определяется

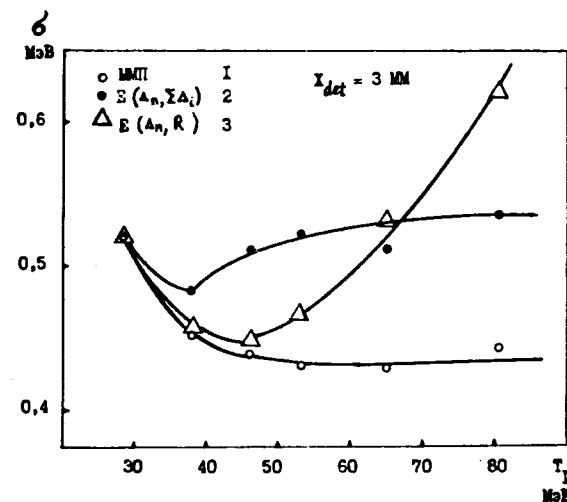


Рис. 3. Расчетные зависимости среднего энергетического разрешения стопки кремниевых ППД. Толщина детекторов 3 мм. 1 - метод максимального правдоподобия, 2 - метод суммирования амплитуд, 3 - пробегный метод.

толщиной последнего "пролетного" ППД, а флуктуации потерь в предыдущих полностью учитываются вследствие высокого /при расчетах идеального/ разрешения ППД. Пробегный метод восстановления энергии /3/ дает ухудшение разрешения с ростом энергии вследствие увеличения флуктуаций пробегов.

Так как результаты расчетов показали, что в широкой области энергий, соответствующей пробегам, меньшим полной толщины стопки, наблюдается слабая зависимость энергетического разрешения от энергии частиц, можно для выделенной области энергий рассматривать зависимость среднего разрешения от толщины ППД. Такая зависимость для протонов с энер-

гней от 20 до 100 МэВ представлена на рис. 4. С помощью подобных кривых можно по заданной точности определить необходимую толщину ППД в стопке. Естественно, что выбор толщин ППД связан также с техническими возможностями обеспечения электронной аппаратурой, изготовления ППД с требуемым разрешением и использования ЭВМ.

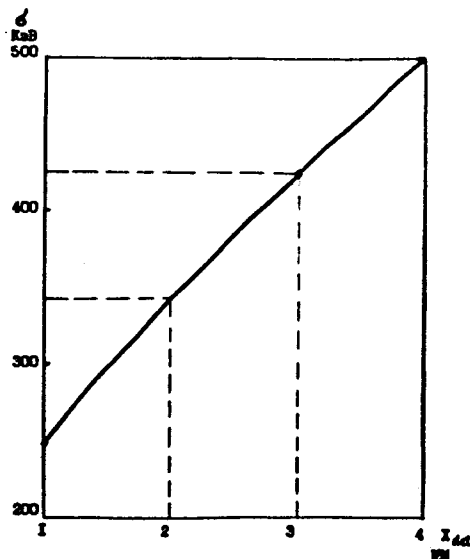


Рис. 4. Расчетная зависимость среднего энергетического разрешения стопки кремниевых ППД от толщины детекторов для протонов с энергией от 20 до 100 МэВ, ММП.

4. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прямая экспериментальная проверка расчетных зависимостей энергетического разрешения затруднена из-за отсутствия пучков частиц с высоким разрешением. Так, для проверки методов измерения энергии с точностью ~ 0,5 МэВ необходим пучок с разрешением

~ 0,1 МэВ. Такого разрешения в области энергий ~ 50 МэВ добиться чрезвычайно сложно. Поэтому мы использовали пробегный метод измерения энергии и отбора входных частиц. На рис. 5 представлена блок-схема электроники для проведения калибровочных измерений. Отбираются частицы, которые прошли через три спектрометрических детектора /Д1, Д2, Д3/ и остановились в тонком детекторе - Д4. Детектор Д5 включен на антисовпадение с детекторами Д1-Д4. Толщина детектора Д4 равна 160 мкм. Энергия протонов, соответствующих данной логике отбора и толщинам ППД, равна 50,2 МэВ. Флуктуации пробегов протонов с такой энергией в кремнии равны 160 мкм. Таким образом, мы достигаем наилучшего разрешения / σ = 150 кэВ/ с помощью измерения пробегов в данной области энергий.

На рис. 6 представлены экспериментальные спектры с трех первых ППД /Д1, Д2, Д3/, полученные при калибровочных измерениях в пучке протонов. Цена канала в спектре первого ППД - Д1 - 71 кэВ, второго - Д2 - 68 кэВ, третьего - Д3 - 137 кэВ. Плавные кривые - результат теоретического расчета, моделирующего экспериментальные условия облучения. На рис. 7 представлены результаты восстановления начальной энергии протонов с помощью ММП по сбросам энергии в первых трех детекторах. Гистограмма - результат восстановления по экспериментальным данным, плавная кривая - по разыгранным при моделировании. Нормировка теоретических кривых проведена по максимумам экспериментальных распределений. Видно, что расхождения в максимумах для экспериментальных и расчетных распределений не превышают 100 кэВ. Расхождение в ширинах распределений обусловлено непарallelностью поверхностей ППД, а также, возможно, сложной формой граничной поверхности между чувствительной и нечувствительной областями ППД. В расчетах поверхности ППД и граничная поверхность между чувствительной областью и "мертвым слоем" полагались строго плоскопараллельными. Следует специально отметить, что в данной "пролетной" методике измерений

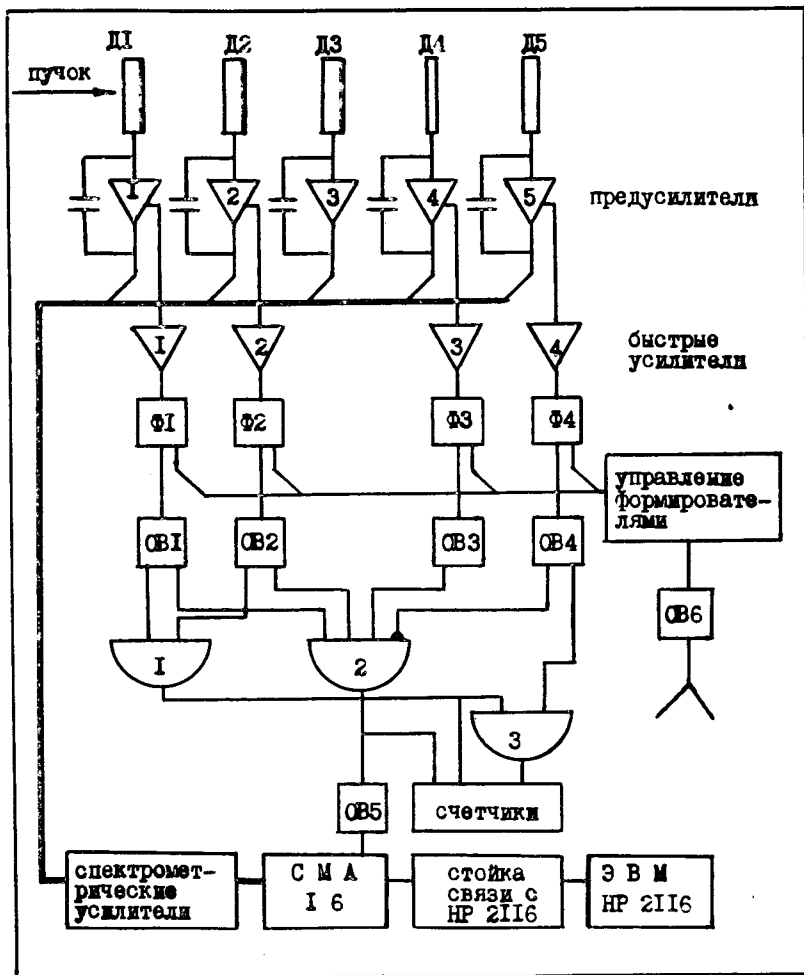


Рис. 5. Блок-схема электроники модели спектрометра для калибровочных измерений в пучках частиц. Д1, Д2, Д3 - Si(Li) ППД, толщина = 4 мм, толщина чувствительной области = 3,5 мм. Д4 - поверхностно-барьерный ППД, толщина = 160 мкм. Д5 - поверхностно-барьерный ППД, толщина = 1,2 мм. СМА - стойка многомерного анализа^{6/}.

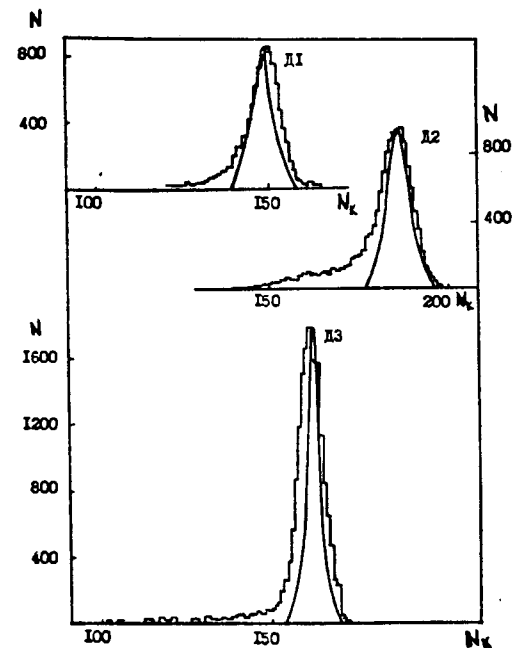


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные распределения потерь энергии в детекторах модели спектрометра $T_p = 50,2$ МэВ.

к плоскопараллельности поверхностей ППД предъявляются высокие требования, чего нет в режиме работы на полное поглощение.

Результаты, полученные на энергии 53 МэВ с помощью кремниевого замедлителя, который устанавливался перед детектором Д4, с той же точностью согласуются с расчетными данными.

Согласие экспериментальных и расчетных распределений служит доказательством корректности выбранных алгоритмов моделирования, правильности определения констант и параметров ППД, а также расчетов зависимостей разрешения от энергии, количества и толщины слоев /рис.1-4/, где использовались те же алгоритмы, что и при моделировании эксперимента. Вместе с тем ширина распределения, полученная при восстановлении

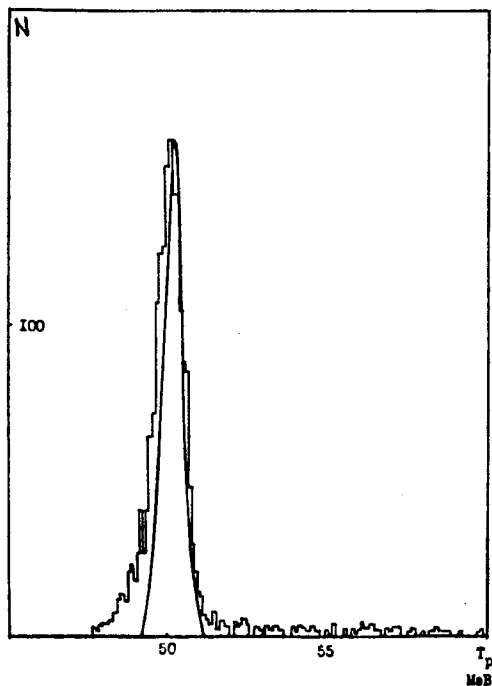


Рис. 7. Спектр энергий протонов, отобранных из пучка при калибровке на модели спектрометра. Гистограмма - результат восстановления с помощью ММП по экспериментальным потерям энергии в детекторах, плавная кривая - по разыгранным при моделировании.

спектра входного отобранного пучка /рис. 7/, не может служить непосредственной оценкой разрешения метода восстановления энергии, так как условия эксперимента не аналогичны калибровке с моноэнергетическим пучком на входе.

В результате выполненной работы показана принципиальная возможность применения стопки полупроводниковых детекторов для измерения энергии ионизирующих частиц в режиме "Напролет". Показано также, что с помощью слоистых спектрометров на основе ППД можно измерять энергию частиц в режиме "Напролет" с точностью $\sim 0,5$ МэВ в широком интервале энергий.

Такой метод измерений пригоден для спектрометрии как положительных, так и отрицательных пионов.

Для улучшения энергетического разрешения предлагается применять метод максимального правдоподобия, основанный на использовании частичных потерь энергии в стопке полупроводниковых детекторов.

Расчетные зависимости энергетического разрешения, типа представленной на рис. 4, позволяют по условиям заданной точности измерений выбрать толщины детекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Payne M.G. *Phys. Rev.*, 1969, 185, p.611.
2. Livingston M.S., Bethe H.A. *Rev.Mod.Phys.*, 1937, 9, p.285.
3. Sternheimer R.M. *Phys.Rev.*, 1966, 145, p.247; *Phys.Rev.*, 1967, 164, p.349.
4. Walske M.C. *Phys. Rev.*, 1952, 88, p.1283; *Phys.Rev.*, 1956, 101, p.940.
5. Skyrme D.J. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1967, 57, p.61.
6. Синаев А.Н., Стахин А.А. ОИЯИ, 13-7556, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 августа 1978 года.