

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



C 345 H

C - 655

86/4-78

Л.М.Сороко

ЛЯП

P9 - 10975

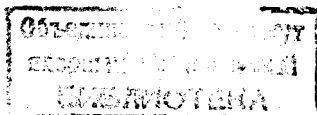
ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭМИТТАНСА ПУЧКА ИОНОВ

1977

P9 - 10975

Л.М.Сороко

ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭМИТТАНСА ПУЧКА ИОНОВ



Сороко Л.М.

P9 - 10975

Измеритель эмиттанса пучка ионов

Описан мультиплексный измеритель эмиттанса пучка ионов, применение которого дает возможность уменьшить время измерений при заданной точности и ослабить влияние нестабильности эмиттанса на результаты измерений. Рассмотрен пример алгоритма обработки данных, получаемых на выходе измерителя.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Soroko L.M.

P9 - 10975

Ion Beam Emittance Scanner

The multiplex ion beam emittance scanner which can diminish the measurement time for the given value of the accuracy and to attenuate emittance instability effects in the course of the measurement is described. An example of the data processing algorithm is considered.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

1. ВВЕДЕНИЕ

Мультиплексными называют такие системы измерений, предметом наблюдения в которых является не искомая функциональная зависимость, например спектр нейтронов по времени пролета, угловое или пространственное распределение частиц, а дискретный кодово-интегральный образ соответствующей искомой функциональной зависимости. Благодаря своим необычным характеристикам мультиплексные системы измерений позволяют обнаружить более тонкие эффекты, чем те, которые доступны системам, основанным на традиционной логике измерений. Основное достоинство мультиплексных систем измерений^{1/} состоит в том, что они существенно повышают информативность опыта при неизменных: а/ значениях разрешающей способности прибора и уровня шумов его приемной части; б/ внешних условиях опыта, например уровне постороннего излучения, продолжительности сеанса измерений; в/ факторах, определяющих дрейф измерительных узлов прибора.

Особенность мультиплексного прибора состоит в том, что процесс интегрального дискретного преобразования идет на измерительной стадии опыта, а не после нее, как это имеет место в традиционных системах обработки данных. Для того чтобы информации, поступившей с мультиплексного прибора, придать привычную форму, выполняют декодирующее преобразование, обратное тому, которое было сделано в мультиплексном приборе на стадии измерения. Преимущество мультиплексной системы измерений тем выше, чем больше требуемое число

точек измерений, необходимое для оценки искомой функциональной зависимости. Если число точек равно единице, то мультиплексную систему измерений построить невозможно.

Потребность в мультиплексных приборах возникает тогда, когда дисперсия оценок искомых величин определяется не статистикой числа полезных событий, а такими факторами, как фон постороннего излучения, шумы детекторов частиц или дрейф параметров измерительных узлов аппаратуры.

Принцип интегрального кодирования информации широко используют в оптической спектроскопии Фурье^{/2/}, спектрометрах Адамара^{/3/}, цифровых системах связи^{/4/}, спектроскопии ядерного магнитного резонанса^{/5/}, а также при изучении спектров медленных нейтронов по времени пролета^{/6/}. Мультиплексные прерыватели пучка нейтронов, появившиеся более 10 лет тому назад, в настоящее время успешно используются при изучении процессов взаимодействия медленных нейтронов с твердым телом. При помощи этих устройств был изучен, например, ранее недоступный фонный механизм^{/6/} взаимодействия нейтронов с твердым телом.

2. ТЕОРИЯ

Принцип работы мультиплексных систем измерений продемонстрируем на простейшем примере - задаче взвешивания трех тел^{/1/}, которая сводится к проведению четырех измерений. Вес каждого тела равен

$$P_i = y_i - y_0, \quad i=1,2,3, \quad /1/$$

где y_0 - результаты холостого взвешивания, а $y_i (i=1,2,3)$ - результаты взвешивания, когда на чашку весов поочередно кладут одно из трех тел. При этом дисперсия измерений равна

$$\sigma_i^2 = \sigma^2(y_i - y_0) = 2\sigma_0^2(y), \quad /2/$$

где $\sigma_0^2(y)$ - ошибка взвешивания, одинаковая для всех измерений.

Проведем тот же эксперимент по иной схеме. В первых трех опытах на чашку весов поместим последовательно по одному из трех тел, а в четвертом опыте - все три тела вместе. Задача содержит четыре неизвестных: веса трех тел, $P_i (i=1,2,3)$, и поправку весов Δ . Составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= P_1 + \Delta, \\ y_2 &= P_2 + \Delta, \\ y_3 &= P_3 + \Delta, \\ y_4 &= P_1 + P_2 + P_3 + \Delta. \end{aligned} \right\} /3/$$

Решая ее, находим как искомые веса тел, так и поправку весов Δ :

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2} [-y_1 + y_2 - y_3 + y_4], \\ P_2 &= \frac{1}{2} [-y_1 - y_2 + y_3 + y_4], \\ P_3 &= \frac{1}{2} [-y_1 - y_2 - y_3 + y_4], \\ \Delta &= \frac{1}{2} [y_1 + y_2 + y_3 - y_4]. \end{aligned} \right\} /4/$$

Легко убедиться в том, что дисперсия измерений, равная

$$\sigma_i^2 = \frac{4\sigma_0^2(y_i)}{4} = \sigma_0^2(y), \quad /5/$$

оказывается вдвое меньше, чем в традиционной схеме.

Еще меньшую дисперсию измерений можно получить, если технологическое условие позволяет помещать взве-

шиваемые тела как на левую, так и на правую чашки коромысловых весов. Тогда возможна третья схема измерений, которая описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= P_1 - P_2 + P_3 + \Delta, \\ z_2 &= -P_1 + P_2 + P_3 + \Delta, \\ z_3 &= P_1 + P_2 - P_3 + \Delta, \\ z_4 &= P_1 + P_2 + P_3 + \Delta. \end{aligned} \right\} /6/$$

Знак минус перед P_1 означает, что данное тело помещают на правую чашку весов вместе с разновесами. Решение системы уравнений /6/ имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{z_4 - z_2}{2}, \\ P_2 &= \frac{z_4 - z_1}{2}, \\ P_3 &= \frac{z_4 - z_3}{2}, \\ \Delta &= \frac{1}{2} (z_1 + z_2 + z_3 - z_4). \end{aligned} \right\} /7/$$

Замечательно то, что дисперсия измерений для третьей схемы, равная

$$\sigma_i^2 = \frac{2\sigma_0^2(y_i)}{4} = \frac{1}{2} \sigma_0^2(y), \quad /8/$$

оказывается вдвое меньше дисперсии отдельного измерения /1/, равной $\sigma_0^2(y)$.

3. ТРАДИЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭМИТТАНСА ПУЧКА ИОНОВ

Эмиттанс, или фазовая плотность пучка ионов, характеризует пространственно-угловую структуру пучка ионов. Поперечное сечение пучка ионов разбивают на элементарные площадки, и каждой элементарной площадке ставят в соответствие число частиц пучка, прошедших через данную элементарную площадку. Это - пространственное распределение частиц по сечению пучка. Частицы, попадающие на данную элементарную площадку, обладают, в свою очередь, угловым распределением, характеризуемым функцией двух переменных, например азимутальным и аксиальным углами. Угловое распределение частиц пучка можно трансформировать в пространственное, если использовать экран. Для этого в пространстве между рассматриваемой элементарной площадкой сечения пучка и экраном наблюдения на частицы не должны действовать никакие силы. Таким образом, пространственно-угловая структура пучка ионов в заданном поперечном сечении пучка определяется функцией четырех переменных: двух пространственных и двух угловых. Эту функцию называют эмиттансом пучка или фазовой плотностью.

Для эффективной работы ускорителя частиц и системы транспортировки пучка ускоренных частиц необходимо, чтобы фазовая плотность тассируемого пучка соответствовала аналогичным параметрам инжектируемых систем и каналов тракта.

Традиционный измеритель эмиттанса пучка ионов /7/ содержит четыре щели, скрещенные попарно в двух плоскостях, перпендикулярных пучку и отстоящих друг от друга на определенном расстоянии. Измеритель эмиттанса пучка ионов содержит систему поступательного перемещения четырех щелей, цилиндр Фарадея с токовым прибором и датчики положения щелей. В современных измерителях эмиттанса пучка ионов /8/ последний разворачивают по двум степеням свободы при помощи электростатических или магнитных полей и результаты измерений отображают на экране электронно-лучевой трубки.

Чтобы выполнить измерения эмиттанса пучка ионов, щели последовательно перемещают вдоль всех четырех координатных осей. Результаты измерений имеют вид четырехмерной функции плотности распределения частиц пучка по двух пространственным и двум угловым координатам. В некоторых случаях, когда функция фазовой плотности пучка ионов обладает определенными свойствами симметрии, используют только две щели, расположенные в разных плоскостях и параллельные друг другу.

Недостаток традиционных систем измерения эмиттанса пучка ионов состоит в том, что система сканирования пучка ионов, содержащая узкие щели, обладает низким значением коэффициента использования пучка. В цилиндр Фарадея попадает малая часть, $10^{-2} \div 10^{-4}$, полного ионного тока. Этот недостаток ощущается в двух случаях. Во-первых, когда пучок ионов имеет низкую интенсивность. В этом случае циклизирований эмиттанса пучка ионов занимает большое время, а постороннее излучение или недостаточная чувствительность измерительного токового прибора отрицательно сказываются на точности результатов. Во-вторых, когда фазовая плотность пучка ионов является нестационарной, причем имеют место вариации фазовой плотности, которые не изменяют суммарную интенсивность пучка ионов, а следовательно, и не могут быть обнаружены при помощи традиционного измерителя эмиттанса пучка ионов.

4. МУЛЬТИПЛЕКСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭМИТТАНСА ПУЧКА ИОНОВ

Для того чтобы повысить коэффициент использования пучка ионов в измерителе эмиттанса пучка ионов и тем самым сократить время измерений при той же точности результатов, а также для того чтобы ослабить влияние на результаты измерений вариаций фазовой плотности пучка ионов, необходимо использовать мультиплексный принцип измерений.

С этой целью традиционную систему сканирования пучка ионов, которая содержит только четыре узкие

щели, видоизменяют следующим образом. Размеры и форму двух широких окон выбирают такими, чтобы пучок ионов беспрепятственно попадал на цилиндр Фарадея. Каждое из двух окон перекрыто подвижными шторками, содержащими определенную систему узких вырезов. Ширину элементарного выреза принимают равной ширине щели в традиционном измерителе эмиттанса пучка ионов. Вырезы в подвижных шторках, попадающие в границы неподвижного окна, располагают в соответствии с законом псевдослучайного кодирования. При этом картина вырезов в шторках в границах неподвижного окна и за его пределами повторяется с периодом, равным N , как в первой, так и во второй плоскости, а число пропускающих и поглощающих элементов, уместяющихся в границах неподвижных окон, равно N - в подвижных шторках первой плоскости и $(2N-1)$ - в шторках второй плоскости, расположенной по пучку за первой плоскостью на определенном расстоянии. Число N равно одному из мультиплексных чисел, например $N=2^n-1$, где n - целое число⁹.

На рис. 1 дана схема мультиплексного измерителя эмиттанса пучка ионов. Для упрощения анализа и наглядности на рис. 1 показаны только две подвижные шторки вместо четырех, требуемых в общем случае.

Измеритель эмиттанса пучка ионов, располагаемый в вакуумном объеме, содержит два экрана с неподвижными окнами 1 и 2. Подвижные шторки 3 и 4 с соответствующей системой вырезов расположены неподвижно перед экраном. При этом в апертуре неподвижного окна 1 уместяется N элементарных вырезов или элементарных перемычек. В апертуре неподвижного окна 2 уместяется $(2N-1)$ элементов. Чем сильнее расходимость пучка, тем больше различие между линейными размерами окон и тем больше различаются линейные размеры элементов. Цилиндр Фарадея 5 располагается на оси пучка и имеет такие поперечные размеры, что захватывает весь пучок ионов, прошедший через открытые окна.

Измеритель эмиттанса пучка ионов содержит также систему дискретного поступательного перемещения шторок с шагом, равным размеру элементарного выреза; датчики положения подвижных шторок, а также аналого-

цифровые преобразователи значений потока ионов, попадающих на цилиндр Фарадея и на обе системы шторок.

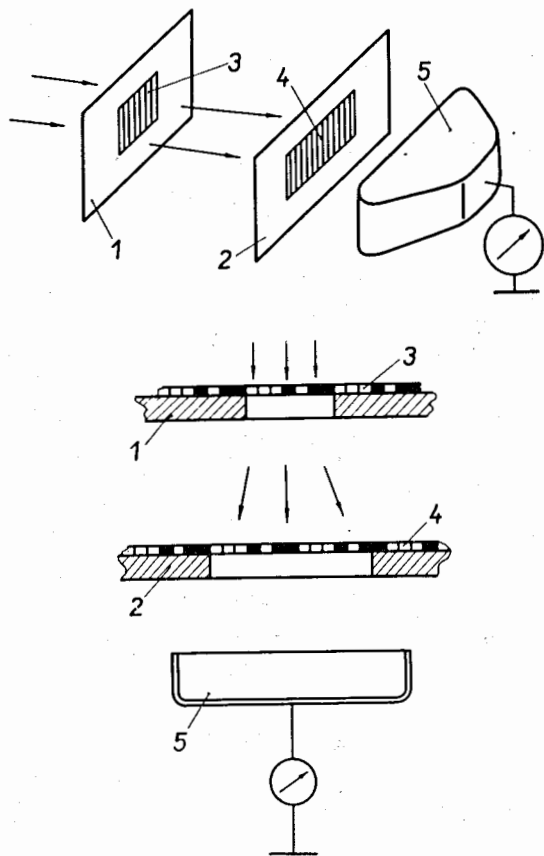


Рис. 1. Схема мультиплексного измерителя эмиттанса пучка ионов с двумя подвижными шторками. 1 и 2 - неподвижные окна, 3 и 4 - подвижные шторки.

Работа измерителя эмиттанса пучка ионов происходит следующим образом. После того как цилиндр Фарадея 5 установлен в положение, при котором захватывается весь пучок ионов, вводят подвижные шторки 3 и 4. Последовательно перемещая подвижные шторки, производят измерения тока пучка ионов, прошедшего через

данную конфигурацию шторок, а также тока пучка в цепи подвижных шторок. В общем случае полный цикл состоит из $N(2N-1)$ измерений для N различных положений подвижной шторки в первой плоскости и для $(2N-1)$ различных положений подвижной шторки во второй плоскости. После завершения такого цикла процесс измерений может быть либо прекращен, либо повторен заново требуемое число раз. Перед каждым новым циклом измерений шторки возвращают в исходные положения.

Полное число искоемых компонент эмиттанса пучка ионов равно N^2 , а полное число возможных измерений составляет $N(2N-1)$. Поэтому из совокупности $(2N^2-N)$ измерений можно выбрать такие N^2 измерений, для которых обратное преобразование к искомым данным выполняется наиболее простым алгоритмом. Как показано в^{10/}, для аналогичной программы мультиплексных измерений оптических спектров, в условиях однородного пучка света, время измерительного цикла при заданной

дисперсии измерений сокращается в $k = \frac{N+1}{4}$ раз по

сравнению со временем измерения в традиционном измерителе эмиттанса пучка ионов.

Чтобы проиллюстрировать принцип работы мультиплексного измерителя эмиттанса пучка ионов и показать характер арифметических операций, выполняемых на стадии обратного преобразования, рассмотрим простейший случай: $N=3$. Это значит, что пространственные координаты, так же как и угловые, разбиты на три элемента, а эмиттанс пучка задается девятью компонентами. При этом в общем случае двумерный эмиттанс не факторизуется на произведение двух одномерных функций, соответственно, пространственных и угловых координат. Значение компоненты эмиттанса пучка для тех ионов, которые проходят через центральный элемент пучка и движутся параллельно оси пучка в пределах угла, ширина которого соответствует элементу углового интервала, выбрано равным единице. Компоненты эмиттанса пучка ионов заполняют матрицу 3×3 /рис. 2/. Каждая компонента эмиттанса имеет физический смысл, который показан на рис. 3.

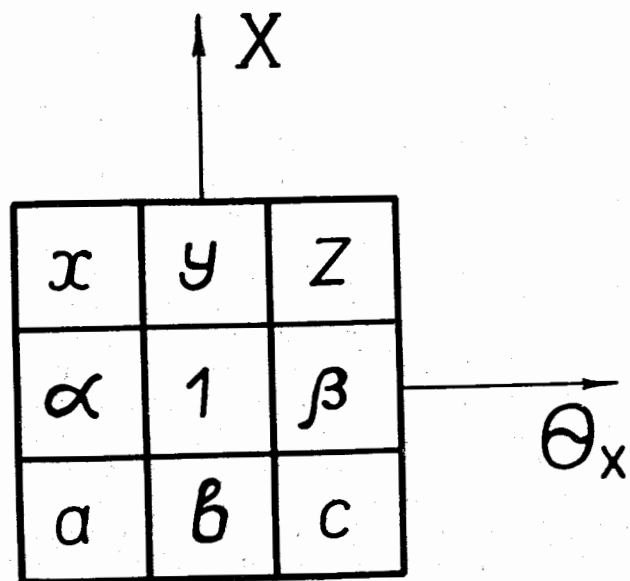


Рис. 2. Матрица компонент эмиттанса пучка ионов для $N=3$.

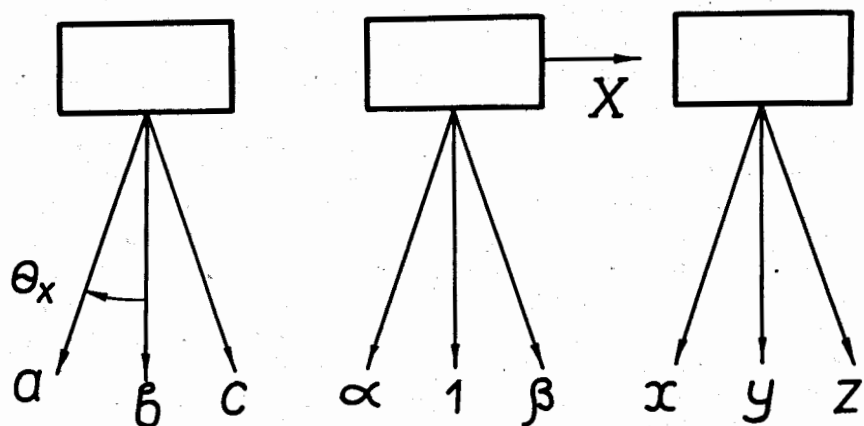


Рис. 3. Схема, поясняющая физический смысл каждой компоненты матрицы эмиттанса пучка ионов для $N=3$ /см. рис. 2/.

Напомним, что для $N=3$ псевдослучайная последовательность равна 1, 0, 1. Единица соответствует вырезу в шторке, а ноль - перемычке. Окно в первой плоскости охватывает $N=3$ элементов подвижной шторки, а окно во второй плоскости охватывает 5 элементов подвижной шторки. Период каждой шторки равен $N=3$ /рис. 4/.

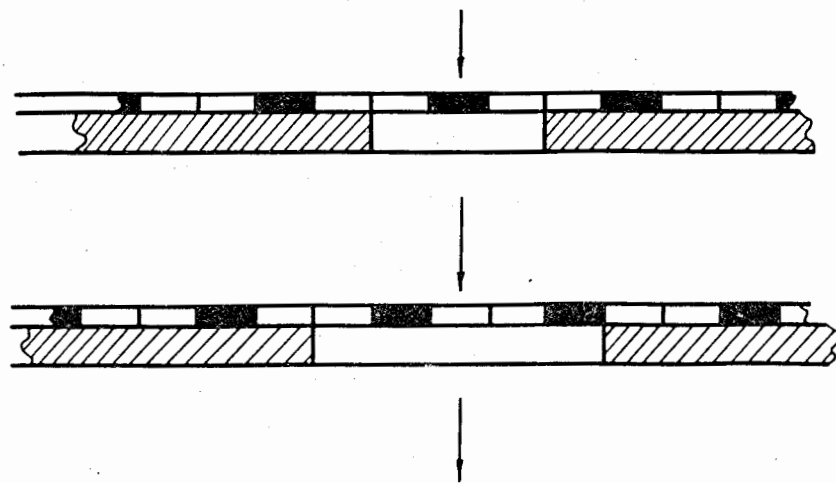


Рис. 4. Схема мультимплексного измерителя эмиттанса пучка ионов с двумя шторками для $N=3$ /см. рис. 1/.

В отличие от традиционной системы измерения эмиттанса пучка ионов, где предметом наблюдения являются сами искомые компоненты: $a, b, c, \alpha, 1, \beta, x, y$ и z , предметом наблюдения мультимплексной системы являются линейные комбинации из искомых компонентов.

Пусть первое измерение выполнено при конфигурации подвижных шторок в первой и второй плоскостях, показанной на рис. 4. В данной конфигурации шторок измеряемая величина A равна сумме:

$$A = a + c + x + y \quad /9/$$

Если подвижную шторку в первой плоскости переместить влево на один шаг, то возникнет новая конфи-

гурация вырезов. Измеренная величина В равна сумме:

$$B = 1 + \beta + x + y. \quad /10/$$

Продолжая процесс перемещения подвижных шторок как в первой, так и во второй плоскостях, получим следующие конфигурации вырезов /рис. 5/ и соответствующие им линейные комбинации исходных величин:

$$\left. \begin{aligned} A &= a+c+x+y, & B &= 1+\beta+x+y, & C &= a+c+1+\beta, \\ D &= b+c+x+z, & E &= a+1+x+z, & F &= b+c+a+1, \\ G &= a+b+y, & H &= a+\beta+y, & K &= a+b+a+\beta, \\ L &= a+c+x+z, & M &= 1+x+z, & N &= a+c+1, \\ P &= b+y+z, & Q &= a+\beta+y+z, & R &= b+a+\beta. \end{aligned} \right\} /11/$$

Один из алгоритмов вычисления искомого компонента эмиттанса пучка ионов имеет вид.

$$\left. \begin{aligned} a &= E - M, & c &= \xi - N, & y &= \psi - \phi - N, \\ \beta &= C - N, & b &= M + \xi - \eta, & z &= \psi - \omega, \\ a &= K - R, & x &= M - z, \end{aligned} \right\} /12/$$

где

$$\left. \begin{aligned} \xi &= R + N, & \eta &= C + E, & \psi &= G + \eta, \\ \omega &= A + K, & \phi &= K + M. \end{aligned} \right\} /13/$$

Видно, что в данном алгоритме неиспользованными оказались измерения В, D, F, H, L, P и Q. Эти измерения, в принципе, можно не выполнять вообще. Если же выполнены все $N(2N-1)$ измерений, то нахождение N^2 компонент эмиттанса можно вести при помощи псевдообратной матрицы ^{/11/}, которая учитывает переопределенность данных, несовместимость уравнений и дает решение, наилучшее по критерию наименьших квадратов.

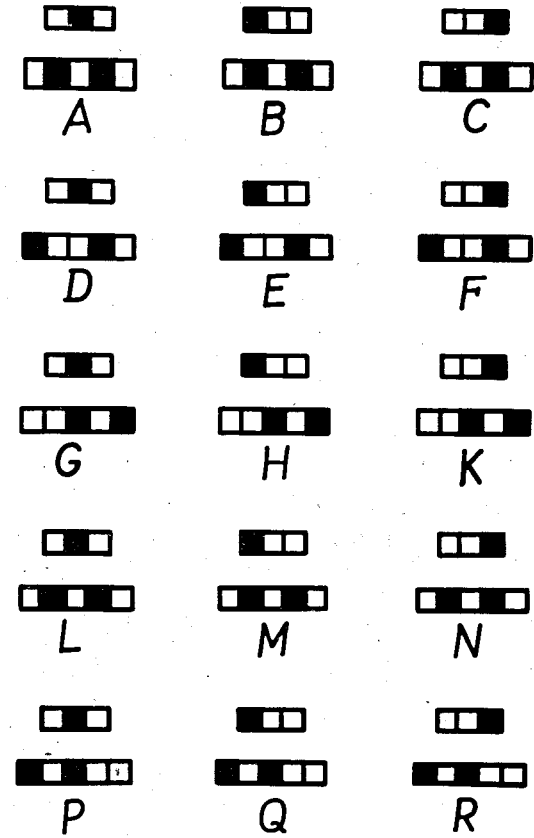


Рис. 5. Полный набор конфигураций вырезов в первой и второй подвижных шторках для $N=3$.

Рассмотренная выше система с $N=3$ не дает никаких преимуществ по сравнению с традиционной системой. Как показано в ^{/10/}, коэффициент сокращения времени измерения, достигаемый в мультиплексной системе измерения эмиттанса пучка ионов, равен

$$k = \frac{N+1}{4}. \quad /14/$$

Видно, что $k=1$ для $N=3$. Однако для больших N коэффициент выигрыша существенно превышает 1.

N	7	15	31	63
k	2	4	8	16

Если измеритель эмиттанса пучка ионов содержит не две шторки, а четыре, то выигрыш дает каждая пара шторок и общий коэффициент выигрыша равен k^2 .

Вторым преимуществом мультиплексного измерителя эмиттанса пучка ионов является то, что вариации картины эмиттанса пучка ионов, не изменяющие полной интенсивности пучка, приводят к дисперсии измерений, которая в \sqrt{N} раз меньше, чем в традиционной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л.М. ПТЭ, 1973, №5, с. 7.
2. Bell R.J. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*. Academic Press, New York, 1972.
3. Decker J.A. *Appl. Optics*, 1971, 10, p. 510.
4. Harmuth H.F. *Transmission of Information by Orthogonal Functions*. Springer, Berlin, 1972.
5. Ernst R.R., Anderson W.A. *Rev.Sci.Instr.*, 1966, 37, No.1, No. 1, p. 93.
6. Глезер В. ЭЧАЯ, 1972, 2, №4, с. 1125.
7. Баталин В.А., Мозучев В.И. ПТЭ, 1966, №5, с. 26.
8. Баталин В.А., Куйбиде Р.П., Шерман В.Е. ИТЭФ-29, Препринт, 1973, Москва.
9. Сороко Л.М. ОИЯИ, P13-5722, Дубна, 1971.
10. Harwit M. e.a. *Appl. Optics*, 1974, 13, p. 2669.
11. Albert A. *Regression and the Moore-Penrose Pseudoinverse*. Academic Press, New York, 1972.
Русский перевод: Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. "Наука", М., 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 сентября 1977 года.