

Установка для измерения эмиттансов пучков заряженных частиц. Галль Л. Н., Грохольский А. С., Хасин Ю. И. — В кн.: Научное приборостроение. Л., «Наука», 1983, с. 46—51.

Для экспериментального измерения параметров пучков реальных источников ионов: площади эмиттанса; диаграммы (т. е. формы контура) эмиттанса и распределения интенсивности в эмиттансе — разработана автоматизированная установка, состоящая из камеры источника ионов, измерительно-управляющего комплекса и системы питания. Измерение параметров пучка ионов в установке производится линейным смещением и поворотом источника ионов в двух взаимноперпендикулярных направлениях относительно неподвижно-установленного коллиматора, за которым расположен детектор ионов. Диапазон линейных перемещений источника в эмиттансометре  $\pm 10$  мм с точностью 0.05 мм, диапазон угловых смещений  $\pm 3^\circ$  с точностью  $1.77'$ , диапазон измеряемых токов от 10 до  $10^6$  имп/с в счетном режиме и от  $10^{-14}$  до  $10^{-11}$  А в аналоговом режиме. Управление сканированием и обработка информации производится с помощью спектроаналитического вычислителя Роса-1, снабженного необходимыми интерфейсными платами. Работа эмиттансометра проиллюстрирована диаграммой эмиттанса, полученного для одного из серийных источников ионов масс-спектрометра. Лит. — 5 назв., ил. — 5.

Л. Н. Галль, А. С. Грохольский, Ю. И. Хасин

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭМИТТАНСОВ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

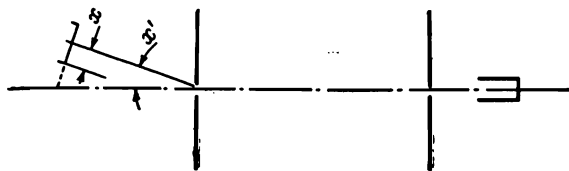
Теория транспортировки пучков заряженных частиц, сравнительно недавно оформившаяся в стройную теорию обобщенной электронной оптики [1—3], оказалась весьма плодотворной и при ее применении в расчетах статических масс-спектрометров [4]. Источники ионов масс-спектрометров, как правило, обладают протяженной областью ионизации; из каждой точки области частицы испускаются в широком диапазоне направлений. В результате пучки, формируемые ионно-оптическими системами источников, оказываются существенно неламинарными. Даже в случае источников, близких к точечным, из-за нелинейностей, связанных с абберациями, пучок также оказывается неламинарным.

Как известно, в теории транспортировки такие пучки описываются с помощью представления о фазовом объеме в 6-мерном фазовом пространстве координат и импульсов  $xuzp_xp_y p_z$ , который занимают частицы пучка. Для пучка, взаимодействием внутри которого можно пренебречь, легко показать, что при движении вдоль любой траектории в ее окрестности плотность частиц остается постоянной, или, другими словами, фазовый объем, занимаемый пучком, ведет себя как несжимаемая жидкость в 6-мерном пространстве. Если плотность частиц зависит от их положения, то объем, ограниченный поверхностью, на которой плотность равна данной, сохраняется. Для пучков, в которых все частицы имеют почти одинаковую компоненту скорости вдоль оси и при этом  $p_x \ll p_z$  и  $p_y \ll p_z$ , для описания движения достаточно 4-мерного пространства  $xuzp_y$ .

Большинство встречающихся на практике пучков имеет две плоскости симметрии или являются аксиально-симметричными. Предположим, пучок симметричен относительно плоскостей  $xz$  и  $yz$ . Тогда эмиттансом пучка  $\epsilon_x$  в плоскости  $xz$  будем называть площадь проекции фазового объема пучка в данном сечении  $z$  на плоскость  $xp_x$ , где  $z$  — расстояние, отсчитываемое вдоль пучка.

Контур ограничивающий проекцию фазового объема на плоскости  $xz$  или  $yz$ , часто называют диаграммой эмиттанса. Диаграмма эмиттанса обладает одним очень важным свойством, вытекающим из свойств фазового объема, занимаемого частицами пучка, а именно: в параксиальном приближении  $x' \sim p_x/p_z$ , где  $x'$  — угол между осью и проекцией вектора скорости частицы на плоскость  $xz$ . Следовательно, если движения частиц в  $x$ - и  $y$ -направлениях не связаны, то при изменении  $z$  плотность точек в пространстве  $xx'$  вблизи некоторой выделенной точки оказывается пропорциональной  $p_z$ . Поэтому площадь, занимаемая данным набором точек, обратно пропорциональна  $p_z$ . А если  $p_z$  не зависит от  $z$ , то плотность точек в пространстве  $xx'$  в окрестности некоторой заданной точки остается постоянной. Площадь, занимаемая данным набором точек, а следовательно, и эмиттанс являются инвариантными величинами. Если же  $p_z$  зависит от  $z$ , то эмиттанс меняется обратно пропорционально  $p_z$ . Поэтому во многих случаях используют в качестве инварианта «нормированный» эмиттанс  $\epsilon_n = \epsilon/E^{1/2}$ , где  $E$  — энергия пучка. Им удобно пользоваться при рассмотрении ускоряемых пучков или при сравнении пучков частиц с различной энергией.

Рис. 1. Схема измерения эмиттанса.



Пучок полностью описывается количественно, если известны эмиттанс пучка, форма диаграммы эмиттанса и распределение интенсивности частиц внутри диаграммы эмиттанса.

Оптимальное согласование источника пучка с последующими элементами оптической схемы требует знания всех этих характеристик и тенденций их изменения в зависимости от параметров источника пучка.

В настоящее время единственным способом определения количественных параметров эмиттанса пучка, формируемого источником ионов, является их экспериментальное измерение. В литературе описано значительное количество устройств, предназначенных для таких измерений и основанных на сканировании пучков специально подобранным набором диафрагм.

В работе [5] приводится подробный анализ методов, применяемых при измерении эмиттансов. Хотя в принципе методы являются довольно простыми, реализация их на практике сопряжена с некоторыми погрешностями, связанными с конечной толщиной сканирующих щелей, угловыми зависимостями эффективности регистрации частиц приемниками и т. д.

В данной работе описывается новая схема измерения эмиттанса пучка, изображенная на рис. 1, которая в основном свободна от упомянутых погрешностей. Как видно из рис. 1, в данной схеме диафрагмы неподвижны и закреплены на оси, приемник также неподвижен, а необходимые для измерения эмиттанса перемещения сообщаются исследуемому источнику пучка. Это позволяет проводить измерения эмиттанса в плоскостях  $xx'$  или  $yy'$  (при повороте источника ионов на  $90^\circ$  вокруг продольной оси).

Использование экспериментально измеренных эмиттансов пучков в качестве исходных данных для расчетов оптических схем и для оптимизации конструкций и режимов работы источников ионов масс-спектрометров предъявляет жесткие требования к установкам, предназначенным для измерения эмиттансов. Это касается прежде всего систем измерения ионного тока, которые должны быть способны измерять малые токи, с одной стороны, а с другой — обладать большим динамическим диапазоном измерения интенсивности токов.

Небольшие величины углов, часто малые линейные размеры пучков в выбранных сечениях заставляют исследователей применять механизмы перемещения подвижных элементов, обеспечивающие точность обработки перемещений порядка сотых долей миллиметра.

Поиск оптимальных режимов работы источников ионов и согласование источников с последующими элементами ионно-оптических схем требуют многократных измерений эмиттансов. Представляется разумным использование в составе установки для измерения эмиттансов мини-ЭВМ, на которую можно возложить функции управления, измерения и обработки сигналов, первичной обработки и регистрации результатов в виде, удобном для дальнейшего использования.

С учетом всего изложенного была разработана и запущена установка, позволяющая автоматически производить измерения эмиттансов пучков источников ионов масс-спектрометров, ионных и электронных пушек. Основные параметры установки:

Диапазон линейных смещений источника, мм . . . . .	$x = \pm 10$
Точность воспроизведения линейных смещений, мм . . . . .	не менее 0,05
Диапазон угловых смещений источника . . . . .	$x' = \pm 3^\circ$
Точность воспроизведения угловых смещений, мрад . . . . .	не менее 0,5
Диапазон измеряемых токов:	
счетный режим, имп/с . . . . .	10— $10^6$
аналоговый режим, А . . . . .	$10^{-14}$ — $10^{-11}$

При создании данной установки широко использовались узлы и блоки приборов, разработанных в СКБ АП АН СССР.

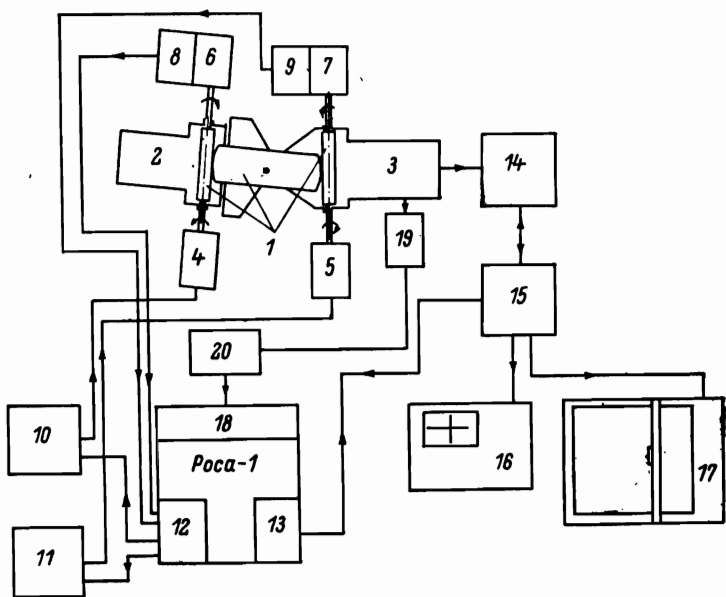


Рис. 2. Блок-схема установки.

1 — механизм сканирования; 2 — камера источников ионов; 3 — приемник заряженных частиц; 4, 5 — шаговые двигатели ШД4-М; 6, 7 — цифровые датчики координат; 8, 9 — согласующие платы; 10, 11 — блоки управления шаговыми двигателями; 12, 13 — интерфейсные платы; 14 — счетчик импульсов; 15 — блок управления отображением; 16 — осциллограф; 17 — двухкоординатный потенциометр; 18 — аналого-цифровой преобразователь; 19 — электрометр; 20 — усилитель постоянного тока.

**Схема установки.** Блок-схема установки представлена на рис. 2. Она состоит из трех основных частей: а) аналитической камеры; б) измерительно-управляющего комплекса; в) вспомогательных блоков, обеспечивающих питание, стабилизацию режимов работы источников ионов и умножителя, контроль вакуума.

Аналитическая камера установки включает в себя камеру источников ионов, механизм сканирования, цифровые датчики координат, коллиматор (на рис. 2 не показан) и приемник заряженных частиц.

Камера источников ионов 2 отличается от обычной камеры тем, что в ней имеется стакан, в котором закрепляется физический узел источников, отсоединенный от фланца. Стакан может поворачиваться вокруг продольной оси камеры с помощью встроенного в камеру механизма. Это дает возможность проводить измерения пучков, не обладающих аксиальной симметрией и имеющих различные эмиттансы в разных плоскостях.

Механизм сканирования источников ионов является основным механическим узлом установки. Схема механизма представлена на рис. 3, а. Вращение вала шагового двигателя 1 через редуктор передается на червяк 2, закрепленный на неподвижной части аналитической камеры. Вращение червяка 2 приводит к повороту червячного сектора 3, находящегося с ним в зацеплении. Червячный сектор 3 жестко закреплен на раме 4, являющейся основанием для направляющей 5. К направляющей 5 жестко прикрепляется подвижная часть аналитической камеры, т. е. камера источников ионов 6. Очевидно, что поворот червячного сектора 3 приводит к повороту камеры источников ионов 6 вокруг оси, проходящей через центр червячного сектора. При любом положении червячного сектора 3 вращение вала шагового двигателя 7 приводит к вращению червяка 8, находящегося в зацеплении с неподвижным при этом червячным сектором 3. В результате этого происходит линейное смещение направляющей 5, на которой закреплен червяк 8. Таким образом, осуществляется линейное смещение камеры источника ионов.

Для исключения возможных перекосов описанный механизм выполнен симметричным (рис. 3, б). Шестерни 9 служат для присоединения цифровых датчиков координат. Механизм воспроизводит любое положение с точностью одного

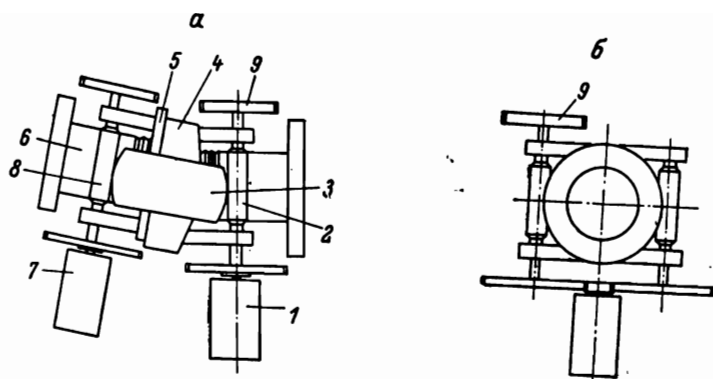


Рис. 3. Механизм сканирования.

а — вид сбоку; б — вид спереди; 1, 7 — шаговые двигатели ШД4 М; 2, 8 — червяки; 3 — червячный сектор; 4 — рама; 5 — направляющая; 6 — камера источников ионов; 9 — шестерня.

шага независимо от направления движения. Накопленная погрешность не превышает одного шага.

Системы линейного и углового перемещений уравновешены пружинным механизмом (на рис. 3 не показан) не менее чем на 96%, что сводит к минимуму приведенные к валам двигателей моменты, необходимые для осуществления перемещений, и погрешность от сил трения. Центры тяжести систем линейного и углового перемещений совпадают, поэтому обе подвижные системы удалось уравновесить одним механизмом.

Цифровые датчики координат представляют собой трехступенчатые преобразователи «угол поворота—код». Схема датчиков изображена на рис. 4. Ступени датчиков — это кодирующие цилиндрические барабаны с пятью дорожками на боковой поверхности. Четыре из этих дорожек используются для кодирования десятичных цифр от 0 до 9, а пятая — для синхронизации. Форма представления чисел двоично-десятичная в коде 8—4—2—1. Дорожки представляют собой чередование зачерненных матовых участков с зеркально отполированными.

При наличии зеркального участка под фотодиодом он засвечивается светом расположенной рядом лампочки (см. рис. 4, б). Это соответствует коду «единица» в данном разряде. Ступени датчиков связаны с механизмом перемещений и между собой так, что барабаны первой ступени поворачиваются на  $36^\circ$  при изменении соответствующей координаты на один шаг, т. е.  $\Delta x = 0.05$  мм и  $\Delta x' = 0.5$  мрад. Барабаны второй ступени поворачиваются на  $36^\circ$  при завершении барабанами первой ступени полного оборота. Аналогично барабаны третьей ступени связаны с барабанами второй ступени. На синхродорожке каждого барабана имеется десять равномерно расположенных узких зеркальных участков. Вычислитель принимает коды с цифровых датчиков только при наличии кода «единица» с синхродорожки, что свидетельствует о правильной работе.

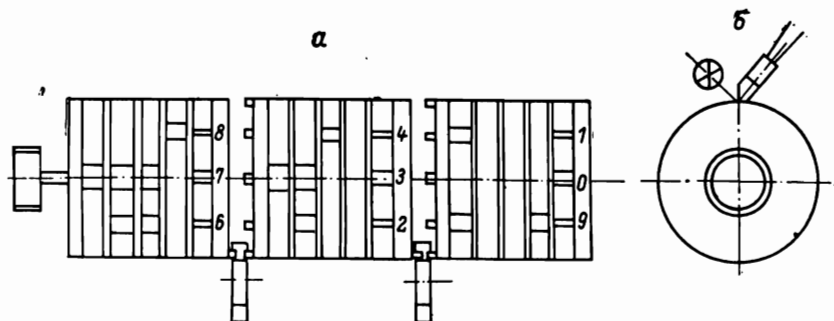
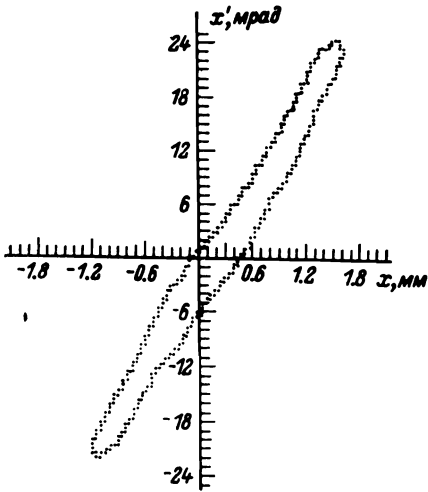


Рис. 4. Схема датчиков координат.

а — вид сбоку; б — вид спереди.

Рис. 5. Диаграмма эмиттанса.



механизма сканирования и отсутствии пропусков шагов двигателей.

Коллиматор представляет собой тщательно изготовленный из немагнитного материала стакан, несущий на торцах сменные диафрагмы. Коллиматор смонтирован на керамическом кольце, может подсоединяться к электрометрическому выводу и служить коллектором ионов. Это дает возможность настраивать исследуемый источник по полному току. При измерениях коллиматор заземляется. Ионный ток, прошедший сквозь коллиматор, далее регистрируется с помощью типового приемника ионов.

Измерительно-управляющий комплекс установки создан на базе вычислителя РОСА-1, снабженного необходимыми интерфейсными платами, и состоит из следующих систем: а) измерения сигналов в счетном режиме; б) измерения сигналов в аналоговом режиме; в) ввода координат; г) управления шаговыми двигателями.

Система измерения сигналов в счетном режиме (рис. 2) состоит из счетчика импульсов 14, блока управления отображением 15, интерфейсной платы 13, вычислителя Роса-1. Счетчик импульсов 14 после входных каскадов усиления импульсов и дискриминатора содержит девять двоичных разрядов. Каждые 100 мкс содержимое девятого разряда счетчика передается в оперативную память вычислителя без блокирования входа счетчика. И только по окончании заданного периода счета счетчик блокируется командой с вычислителя и снимается содержимое младших разрядов счетчика. В вычислителе программно производится определение суммарного результата счета за период. Связь счетчика с вычислителем и управление его работой осуществляется через блок управления отображением 15 и интерфейсную плату 13.

Система измерения сигналов в аналоговом режиме содержит электрометрический усилитель, усилитель постоянного тока и является типовой схемой измерения сигналов современных отечественных масс-спектрометров. Сигнал с выхода усилителя постоянного тока попадает на вход аналого-цифрового преобразователя вычислителя Роса-1. Результатом является среднее арифметическое 256 отдельных измерений сигнала.

Система управления шаговыми двигателями (рис. 2) состоит из интерфейсной платы 12, блоков управления шаговыми двигателями 10, 11 и шаговых двигателей 4, 5. С вычислителя через интерфейсную плату 12 на входы блоков 4 и 5 поступают пакеты импульсов. Единичному шагу соответствуют 16 импульсов в пакете. Реверс двигателей осуществляется программно.

Система ввода координат (рис. 2) содержит цифровые датчики координат 6, 7, согласующие платы 8, 9 и интерфейсную плату 12. Система осуществляет ввод в вычислитель кодов реальных координат. Считывание кодов последовательное поступенчатое.

**Работа установки.** Измерение эмиттанса начинается с ввода с пульта вычислителя исходных данных, определяющих режим работы установки. Эти данные складываются из чисел, определяющих следующие показатели: а) кратность шага по линейной координате; б) кратность шага по угловой координате; в) предельное значение линейной координаты; г) предельное значение угловой координаты; д) пороговый уровень интенсивности измеряемых токов.

При наличии всех перечисленных данных в памяти вычислителя установка, запущенная с пульта вычислителя, производит автоматический поиск диаграммы эмиттанса на заданном уровне интенсивности. В процессе поиска границы текущие значения координат граничных точек запоминаются в оперативной памяти вычислителя. При необходимости эти координаты можно выводить на

цифropечатающее устройство вычислителя, получать изображение диаграммы эмитанса с помощью двухкоординатного самописца. При прохождении каждой следующей граничной точки определяется расстояние между ней и первой граничной точкой. Условием окончания работы является равенство нулю или единице (в шагах двигателя) этого расстояния.

В программе вычислителя предусмотрены следующие режимы: измерения распределения ионного тока по одной из координат при любом фиксированном значении другой координаты; вычисления площади, ограниченной диаграммой, т. е. эмитанса; вычисления полного тока в области, ограниченной диаграммой.

Установка устойчиво работает, если флуктуации значений измеряемых интенсивностей токов меньше, чем изменение интенсивности при смещении источника на один шаг по любой из двух координат.

На рис. 5 изображена диаграмма эмитанса, полученная на описанной установке, для одного из серийных источников ионов масс-спектрометра. Режим работы источника выбран произвольно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бенфорд А. П. Транспортировка пучков заряженных частиц. М., 1969.
2. Лихтенберг А. Динамика частиц в фазовом пространстве. М., 1972.
3. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М., 1980.
4. Саченко В. Д. — В кн.: Методы расчета электронно-оптических систем. Сер. Электроника СВЧ. Вып. 4. М., 1974, с. 101.
5. Steenbergen A. van. — Nucl. Instrum. Meth., 1967, v. 51, p. 245.