

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И УГЛОВОГО АНАЛИЗА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(Обзор)

*Л. А. Баранова, С. Я. Явор*

Рассмотрены основные типы энергоанализаторов, применяемых при диагностике поверхности для измерения энергетических и угловых спектров заряженных частиц. Приведены характеристики трех групп спектрометров: с задерживающим потенциалом, с механически перемещаемым и с неподвижным дисперсионным анализатором. Описан ряд конкретных приборов, даны их параметры и указаны особенности применения.

Исследование процессов взаимодействия пучков заряженных частиц с веществом позволяет получить большое количество информации, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение. В последнее время значительно возрос интерес к изучению поверхности и различных процессов, происходящих на границе раздела твердое тело—вакуум (или плазма). Для проведения этих исследований разработаны многочисленные методики, среди которых можно назвать спектрометрию рассеяния медленных электронов и ионов, фотоэлектронную спектроскопию, вторично-ионную масс-спектроскопию и др. [1, 2].

Установки, реализующие перечисленные методики, как правило, содержат энергоанализаторы заряженных частиц. В проводимых ранее исследованиях основное внимание уделялось анализу энергетических распределений заряженных частиц в широком диапазоне энергий (от нескольких мВ до нескольких десятков кВ). В последнее десятилетие существенно возросло число работ, посвященных изучению угловых распределений. Угловые спектры позволяют получить дополнительную информацию о свойствах исследуемого объекта. Так, например, путем установления связи энергии электронов с их волновым вектором (дисперсионных соотношений) можно получить сведения о зонной структуре приповерхностных слоев. В экспериментах с отдельными атомами угловые распределения вторичных электронов дают сведения о заселенности магнитных подуровней и тем самым о выстроенности и ориентировании атомов.

Существует ряд обзоров и монографий, в которых подробно рассмотрены различные типы электростатических спектров, применяемых при исследовании энергетических распределений заряженных частиц [3-7]. Целью данного обзора является описание спектрометров, пригодных для проведения как энергетического, так и углового анализа, поскольку до настоящего времени нет публикаций, обобщающих имеющиеся в этой области сведения. В обзоре приведены электронно-оптические схемы приборов, их основные параметры и особенности применения.

Для углового анализа используются как бездисперсионные анализаторы, так и анализаторы, обладающие дисперсией. Основными характеристиками любых типов анализаторов являются: разрешающая способность, определяемая как отношение энергии пучка заряженных частиц к разрешаемому интервалу

энергии  $R = E/\Delta E$ , и светосила, равная телесному углу пучка, исходящего из точечного источника, который проходит через анализатор без потерь. При источнике конечных размеров целесообразно использовать понятие светимости. Она равна произведению светосилы на используемую площадь источника и характеризует полный ток пучка, проходящий через спектрометр. Иногда вместо разрешающей способности применяют обратную величину  $\rho$ , называемую разрешением, которую, как правило, определяют в процентах

$$\rho = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 \%$$

Дисперсионные анализаторы, кроме того, характеризуются величиной дисперсии  $D$ , которая пропорциональна смещению изображения моноэнергетического источника при малом изменении энергии пучка

$$D = E \frac{dz}{dE},$$

где  $E$  — энергия пучка. Существенным фактором, определяющим качество анализатора, является величина абберационного уширения изображения. Подробное рассмотрение этих понятий, а также формулы для расчета основных параметров даны в [5, 6].

Остановимся вначале на описании бездисперсионных анализаторов. Они основаны на принципе задерживающего потенциала и в качестве электродов содержат сетки высокой прозрачности, на одну из которых подан тормозящий потенциал. Такие анализаторы могут работать на «пропускание». В этом случае тормозящим электрическим полем отсекаются частицы низких энергий и детектор регистрирует только те частицы, энергия которых достаточна для преодоления созданного потенциального барьера. Измеряемый детектором ток  $I(V_s)$  равен

$$I(V_s) = \int_{V_s}^{\infty} i(V) dV. \quad (1)$$

Здесь  $V_s$  — задерживающий потенциал;  $i(V)dV$  — ток, образуемый частицами, энергия которых лежит в интервале от  $eV$  до  $e(V+dV)$ .

Возможна также работа бездисперсионных анализаторов в режиме «отражения», когда отсекаются частицы высоких энергий. При этом на детектор попадают только те частицы, энергия которых меньше некоторой пороговой. Регистрируемый ток дается формулой

$$I(V_s) = \int_0^{V_s} i(V) dV. \quad (2)$$

Энергетический спектр  $i(V)$  заряженных частиц в обоих случаях получается путем дифференцирования по потенциалу функции  $I(V_s)$ . Таким образом, в бездисперсионных спектрометрах измерение тока детектором и получение распределения заряженных частиц по энергии представляют собой два отдельных этапа.

В описываемых спектрометрах сетки должны быть перпендикулярны вектору скорости заряженных частиц по возможности во всех точках. В противном случае мы будем измерять не полную энергию частиц, а только ее составляющую, нормальную к сеткам. Поэтому для параллельного пучка сетки должны быть плоскими, а для расходящегося из точки — сферическими с центром на объекте. Таким образом, возникает техническая задача создания сеток требуемой формы достаточно жестких и в то же время прозрачных.

Достоинством энергоанализаторов с задерживающим потенциалом является большая светосила, он может захватывать большой телесный угол вплоть до  $2\pi$  ср при использовании сферических сеток. Кроме того, такие приборы позволяют проводить одновременный анализ заряженных частиц по энергии и углам вылета из образца.

Вместе с тем эти анализаторы имеют ряд серьезных недостатков. К ним относится вторичная эмиссия, вызванная столкновениями анализируемых частиц с сетчатыми электродами, что может привести к появлению ложных пиков в спектре. Провисание поля в ячейках сетки создает дополнительный линзовый эффект, ухудшающий разрешение. Величина эффекта зависит от отношения расстояния между сетками к размеру отверстий в них. Принципиальным недостатком метода является необходимость дифференцирования экспериментально полученной зависимости полного тока от задерживающего потенциала. Вносимая при этом ошибка существенно ограничивает разрешающую способность. При проведении анализа нас интересуют только те частицы, которые проходят через сетки с очень малой кинетической энергией. Вместе с тем ток на детектор существенно больше, так как создается всеми частицами, энергия которых выше пороговой (или ниже в схемах с «отражением»). Это значительно уменьшает отношение сигнал—шум в системах с задерживающим потенциалом.

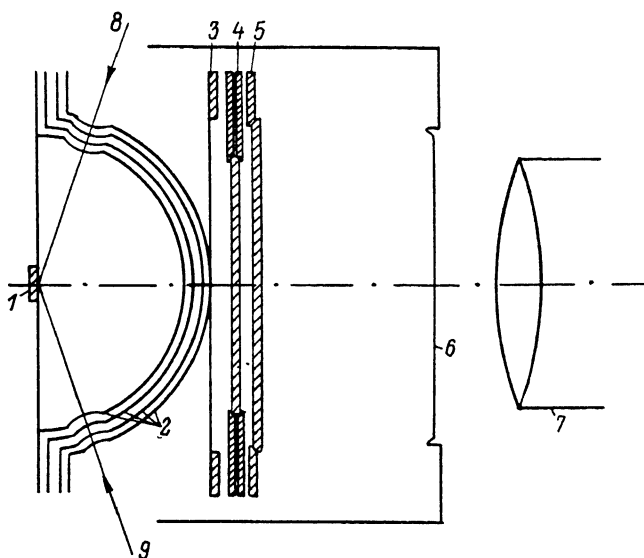


Рис. 1. Схема бездисперсионного энергоанализатора с четырьмя сферическими сетками. 1 — образец, 2 — сферические сетки, 3 — экранирующая сетка, 4 — микроканальная пластина, 5 — флуоресцирующий экран, 6 — окно, 7 — камера видикона, 8 — поток фотонов, 9 — поток электронов.

Рассмотрим несколько бездисперсионных анализаторов, применявшихся на практике и описанных в литературе. В работе [8] рассмотрен прибор, предназначенный для электронной спектроскопии с угловым анализом. Он базируется на схеме, состоящей из четырех сеток и обычно применяемой в методе дифракции медленных электронов (рис. 1). Сетки имеют форму полусфер, центр кривизны которых совпадает с образцом. Ближайшая к образцу сетка находится под одинаковым с ним потенциалом (обычно под потенциалом Земли), и электроны, вылетевшие с образца, движутся до нее в эквипотенциальном пространстве. На вторую и третью сетки подается одинаковый замедляющий потенциал, отсекающий частицы низких энергий. Четвертая сетка заземлена.

Прошедшие тормозящее поле электроны попадают на микроканальную пластину, находящуюся под потенциалом 600—1500 В и усиливающую интенсивность электронного потока в  $10^2$ — $10^3$  раз. Для экранирования анализатора от потенциала, приложенного к микроканальной пластине, непосредственно перед ней расположена плоская заземленная сетка. Усиленный пластиной электронный поток вызывает свечение флуоресцирующего экрана. Очевидно, что каждая точка изображения на экране соответствует определенному углу вылета электронов с образца, а яркость ее свечения пропорциональна интенсивности эмиссии в данном направлении. С помощью видикона информация снимается с экрана и передается на ЭВМ. Описанная система охватывает телесный угол  $70^\circ \times 70^\circ$  с угловым разрешением  $\pm 1.5^\circ$ . Для получения углового спектра эмис-

сии при заданной кинетической энергии необходимо провести два измерения интенсивности для близких значений задерживающего потенциала и вычесть один результат из другого. Последовательно изменяя задерживающий потенциал, можно получить полный энергетический и угловой спектры. Время снятия энергетического спектра для 2500 значений углов вылета составляет 30—40 мин.

На рис. 2 в качестве примера представлено распределение интенсивности электронов по углам вылета с образца в опытах по дифракции медленных электронов. Картина соответствует перпендикулярному падению пучка электронов с энергией 52 эВ на образец Si (111).

Недостатком описанного прибора является малое энергетическое разрешение, особенно в области низких энергий. Это связано с тем, что интенсивность в данном энергетическом интервале определяется как разность двух близких больших величин.

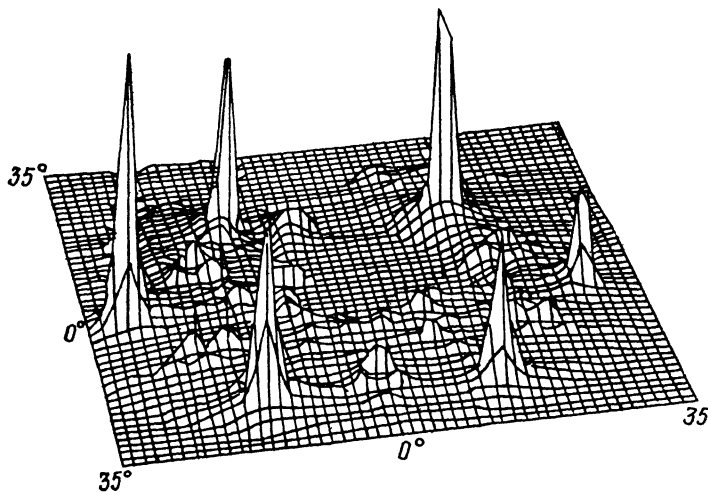


Рис. 2. Распределение интенсивности электронов в зависимости от углов вылета с образца. (Дифракция медленных электронов).

Более совершенная схема бездисперсионного анализа описана в работе [9]. Спектрометр состоит из эллипсоидального зеркала, образованного двумя электродами, один из которых сетчатый, и обычной системы из четырех сферических сеток. Зеркало отсекает частицы высоких энергий, а сферические сетки — частицы низких энергий. В результате система в целом пропускает электроны в узком энергетическом интервале.

Схематическое изображение спектрометра представлено на рис. 3. Образец расположен в одном из фокусов эллипсоида и может облучаться синхротронным излучением или электронным пучком с энергией 1—2 кэВ для оже-спектроскопии и 0—400 эВ для исследования дифракции медленных электронов. Эмиттируемые фотоэлектроны или вторичные электроны с энергией ниже  $eV_r$  (где  $V_r$  — разность потенциалов между электродами зеркала) отражаются зеркалом и собираются во втором его фокусе. Последний совмещен с центром кривизны сферических сеток.

Как обычно, две крайние сетки заземлены, а на две средние подается задерживающий потенциал  $V_z$ . Эту часть анализатора проходят электроны с энергией выше  $eV_z$ . Таким образом, пропускаемый энергетический интервал равен  $\Delta E = e(V_z - V_r)$ . Далее электроны попадают на микроканальные пластины, усиливающие интенсивность до  $10^7$  раз. За пластинами расположены флуоресцирующий экран и система регистрации, позволяющая получить или энергетический спектр, проинтегрированный по углам, или спектры с разрешением как по энергии, так и по углу.

Приведем некоторые параметры прибора. Его размеры можно характеризовать меньшим радиусом кривизны эллиптического зеркала, который состав-

ляет 10 см; эксцентриситет равен 0.2. Достоинством системы является большая захватываемый телесный угол ( $85^\circ \times 85^\circ$ ), а также наличие достаточного свободного пространства вокруг образца. Угловое разрешение составляет примерно  $2^\circ$ . Разрешаемый энергетический интервал составляет 0.1—0.2 эВ при диаметре образца, равном 1 мм, и энергии настройки 10 эВ. В приборе используется замедляющая система из двух сферических сеток, расположенная между образцом и эллипсоидальным зеркалом.

Имеется еще ряд аналогичных систем с задерживающим потенциалом, однако в настоящее время наблюдается тенденция к использованию дисперсионных спектрометров для проведения углового анализа. Они свободны от большинства недостатков, присущих бездисперсионным приборам и перечисленным выше. Основное достоинство анализаторов, обладающих дисперсией, заключается в пространственном разделении заряженных частиц различной энергии. Кроме того, поля таких анализаторов могут фокусировать пучки заряженных частиц. Оба эти свойства обеспечивают возможность получения большой раз-

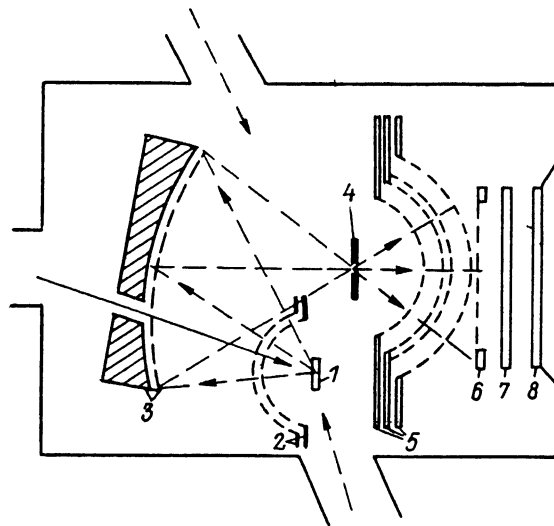


Рис. 3. Схема бездисперсионного энергоанализатора, пропускающего частицы в узком энергетическом интервале.

1 — образец, 2 — замедляющая система, 3 — эллипсоидальное зеркало, 4 — диафрагма, 5 — сферические сетки, 6 — экранирующая сетка, 7 — микроканальные пластины, 8 — флуоресцирующий экран.

решающей способности и высокого отношения сигнал—шум. Однако, как правило, светосила таких приборов меньше, чем сеточных.

Как известно, дисперсионные анализаторы могут работать в двух основных режимах. В режиме спектрографа весь спектр анализируемых энергий регистрируется одновременно на детекторах большой площади. Если прибор работает как спектрометр, энергетическое распределение пучка частиц исследуется последовательно во времени. При анализе как энергетического, так и углового распределений заряженных частиц возможна ситуация, когда прибор работает как спектрограф при снятии углового спектра и как спектрометр при регистрации энергетического.

Отметим, что в спектрометрах существуют два способа снятия энергетических распределений заряженных частиц. Первый заключается в изменении потенциалов на электродах анализатора таким образом, чтобы через выходную щель последовательно проходили частицы разных энергий. Во втором способе энергия настройки анализатора остается постоянной, а меняется энергия пучка на входе в анализатор с помощью специальных входных устройств. При этом в первом способе остается постоянной по спектру разрешающая способность, а ширина разрешаемого энергетического интервала меняется пропорционально изменению энергии пучка. Это приводит к изменению ширины пиков в спектре. Во втором сохраняется разрешаемый интервал энергий, а разрешающая способность возрастает с ростом энергии частиц.

При использовании входных устройств, осуществляющих предварительное замедление (или ускорение) частиц, необходимо сохранить фокусировку пучка на входную щель, несмотря на изменение его энергии. Для этого применяются так называемые «изофокусирующие» или «zoom»-линзы. Они представляют собой многоэлектродные электростатические линзы, причем потенциалы на крайних электродах определяются входной и выходной энергией частиц, а потенциалы на промежуточных электродах задаются таким образом, чтобы осталось постоянным положение изображения объекта (на входной щели анализатора). В некоторых случаях, если имеется достаточное количество независимо варьируемых потенциалов на электродах, можно сохранить постоянным также линейное увеличение.

Параметры пучка заряженных частиц, формируемого входным устройством, подчиняются закону Гельмгольца—Лагранжа

$$GM = \sqrt{\Phi_0 \Phi_i}, \quad (3)$$

где  $G$  — угловое увеличение устройства,  $M$  — его линейное увеличение,  $\Phi_0$  — потенциал пространства перед линзовой системой,  $\Phi_i$  — за ней. Следовательно, при торможении, если линейное увеличение остается постоянным, то угловое растет и возрастает угол расходимости пучка на выходе из системы. В этом случае через входную щель анализатора проходит меньшая часть пучка, что приводит к уменьшению чувствительности при возрастании энергии, а значит, к искаженной передаче относительной интенсивности линий в спектре.

Строго говоря, с входной щелью анализатора следует совмещать не изображение исследуемого образца, а кроссовер пучка заряженных частиц. Положение кроссовера может значительно отличаться от положения изображения, если фокусирующая система работает с увеличением, превышающим единицу, и фазовый объем пучка велик [10].

Традиционными и наиболее широко используемыми энергоанализаторами при исследовании взаимодействия излучения или пучков заряженных частиц с веществом являются плоский конденсатор, цилиндрическое и сферическое зеркала. При исследовании частиц высоких энергий применяются цилиндрические и сферические дефлекторы, в которых осевые траектории совпадают с эквипотенциальными линиями. Сравнительно новыми устройствами являются тороидальный, коробчатый, конусный и другие спектрометры. Здесь мы подробнее остановимся на рассмотрении тех спектрометров, которые могут применяться для одновременного исследования распределения заряженных частиц по энергии и углу вылета из образца.

Наиболее очевидным способом проведения такого анализа является механическое перемещение анализатора, позволяющее последовательно регистрировать энергетические спектры потоков частиц, вылетающих под разными углами. При этом одним из основных требований к анализатору являются малые габариты.

В качестве примера приведем схему для исследования поверхности монокристаллов, основанную на указанном принципе [11]. Основные узлы показаны на рис. 4. Они размещены в цилиндрической камере и включают держатель и манипулятор образцов, две электродные пушки для создания первичных пучков, дифрактометр для контроля состава и структуры поверхности, смотровое окно. В установке используется анализатор типа «коробки», предложенный в работе [12]. Он может вращаться в плоскости рисунка вокруг оси, проходящей через центр камеры. Диапазон углов поворота составляет  $100^\circ$ , точность отсчета —  $0.2^\circ$ . Анализатор состоит из плоского и П-образного электродов, расположенных так, что в сечении получается прямоугольник (рис. 5, а). Плоский электрод заземлен, и на нем находятся входная и выходная щели. На П-образный электрод подается отражающий потенциал. Анализатор помещен в кожух, служащий электростатическим экраном. Магнитное поле компенсируется с помощью трех пар катушек Гельмгольца.

Преимуществом коробчатого анализатора перед плоским конденсатором является наличие пространственной фокусировки и большая дисперсия. Энергетическое разрешение, оцененное на полувысоте пика упругоотраженных элек-

тронов, составляет 0,4 %. Величина телесного угла, захватываемого анализатором, составляет  $2^\circ$  в плоскости вращения анализатора и  $1^\circ$  в перпендикулярной плоскости. Анализатор имеет малые размеры, расстояния между щелями (входной и выходной) 37 мм, ширины щелей 0,25 мм. Созданная установка позволила экспериментально исследовать анизотропию взаимодействия электронов средней энергии (0,5—1,5 кэВ) с поверхностью монокристаллов при достаточно высоком энергетическом и угловом разрешении.

Для измерения углового и энергетического спектров используется также механически перемещаемый анализатор, электроды которого имеют форму лемнискатических цилиндров [13]. Схематическое изображение анализатора дано на рис. 5, б. Распределение потенциала в двумерном приближении в безразмерных величинах здесь имеет вид

$$\varphi(x, y) = -(x^2 - y^2)/2(x^2 + y^2)^2. \quad (4)$$

В плоскости дисперсии (плоскость  $xOz$ ) уравнения траектории могут быть проинтегрированы в элементарных функциях. Исследования показали, что относительная линейная дисперсия связана с углом  $\alpha$  (угол, который осевая траектория пучка составляет с плоскостью  $yOz$ ) соотношением

$$D/d = 1/2 \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

где  $d$  — база анализатора, равная расстоянию вдоль оси  $z$  между источником и приемником. Следовательно, увеличение угла входа частиц приводит к росту линейной дисперсии. В работе найдены режимы, совмещающие фокусировку второго порядка в плоскости дисперсии с пространственной фокусировкой при угле  $\alpha = 60^\circ$ . В этом случае относительная дисперсия равна 2, что в три раза больше относительной дисперсии плоского конденсатора с вынесенным источником и фокусировкой второго порядка.

Аналогичные параметры могут быть получены в анализаторе более простой формы, электроды которого представляют собой два круговых цилиндра с общей образующей (рис. 5, в). Распределение потенциала в двумерном приближении получено методом конформных отображений [14]

$$\varphi(x, y) = \frac{Vd_2}{d_2 - 1} \left( 1 - \frac{y}{x^2 + y^2} \right). \quad (6)$$

Здесь  $V$  — разность потенциалов между электродами (потенциал внутреннего электрода предполагается равным нулю),  $d_2$  — диаметр внешнего электрода. Все линейные размеры даны в единицах диаметра  $d_1$  внутреннего электрода. В плоскости дисперсии траектории здесь записываются в аналитическом виде. В работе рассчитаны характеристики анализатора в широком диапазоне изменения геометрических и электрических параметров.

Недостатком описанного способа регистрации спектров является значительное усложнение конструкции и техники эксперимента, связанное с необходимостью механического перемещения анализатора в высоком вакууме. Кроме того, последовательное снятие углового спектра приводит к значительному возрастанию времени эксперимента. При этом увеличивается загрязнение образца и растет количество дефектов, возникающих в образце под действием первичного пучка. Исключается также возможность исследования короткоживущих поверхностных состояний.

Существенным прогрессом в этой области явилась разработка дисперсионных энергоанализаторов, в которых происходит одновременная регистрация большей части углового спектра. При этом оказывается возможным сократить время снятия угловых спектров примерно на два порядка. Рассмотрим несколько схем, применявшихся на практике и приведенных в литературе.

В работе [15] описано использование плоского конденсатора для одновременного исследования распределений фотоэлектронов по энергии и углу вылета из образца. Схематическое изображение спектрометра дано на рис. 6. Электроны эмитируются из малой области образца под воздействием падающего на него света. Они ускоряются однородным полем и последовательно проходят через две линейные щели, которые вырезают плоский веерообразный пучок. В дей-

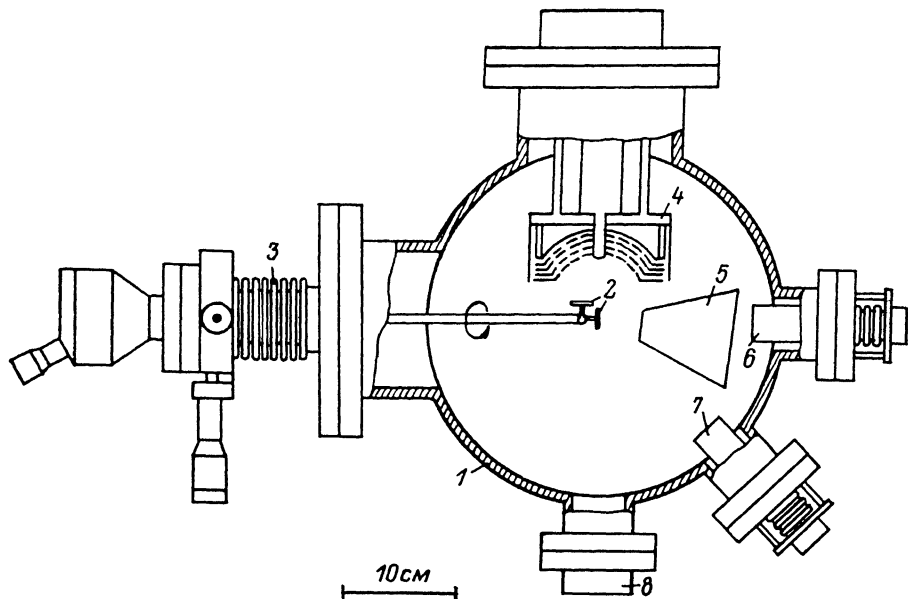


Рис. 4. Основные узлы спектрометра с перемещаемым анализатором.

1 — камера; 2 — образцы; 3 — манипулятор образцов; 4 — дифрактометр; 5 — дисперсионный анализатор; 6, 7 — электронные пушки; 8 — смотровое окно.

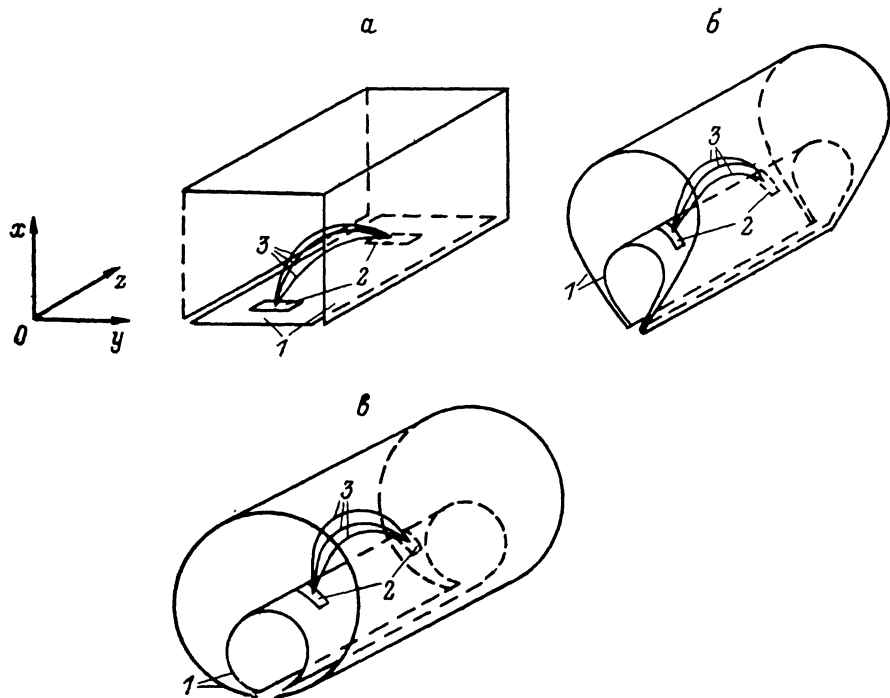


Рис. 5. Схемы некоторых энергоанализаторов.

а — коробчатый, б — лемнискоидальный, в — в виде круговых несомных цилиндров. 1 — электроды, 2 — входная и выходная щели, 3 — траектории заряженных частиц.



ствительности веер не бесконечно тонкий, он имеет некоторый малый угол раствора в направлении, перпендикулярном его плоскости. Пучок входит в отклоняющее однородное поле таким образом, что его плоскость располагается под углом  $45^\circ$  к пластинам анализатора. В поле электроны разделяются по энергии и фокусируются по указанному углу раствора на нижнюю пластину конденсатора, затянутаю сеткой. Таким образом на сетке создается двумерная картина распределения интенсивности, которая затем с помощью электронной камеры отображается на электронно-графическую пластину. Можно сказать, что данный спектрометр в одном направлении диспергирует частицы по энергии, а в другом — разворачивает их угловой спектр. Однако координаты точек изображения нелинейно связаны с энергией и углом вылета. На рис. 7 представлена плоскость изображения, где показаны линии постоянной энергии и линии постоянного угла вылета, которые определены путем расчета траекторий заряженных частиц в системе.

Угловое и энергетическое распределения фотоэлектронов, эмиттируемых образцом, рассчитываются на компьютере исходя из плотности почернения электронно-графической пластины. Последняя действует как линейный и высоко чувствительный детектор числа электронов.

Размеры прибора сравнительно невелики: расстояние от входной щели до точки попадания электронов на сетку 4—6 см, ширина щели 0.1 мм, интервал измеряемых углов  $60^\circ$ . Энергетическое разрешение равно 0.05 эВ вблизи порога фотоэмиссии, угловое разрешение невелико и составляет  $5^\circ$ .

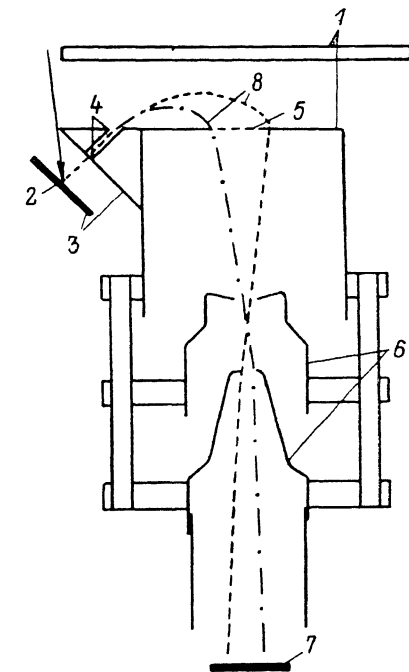


Рис. 6. Схематическое изображение фотоэлектронного спектрометра на основе плоского конденсатора.

1 — электроды анализатора, 2 — образец, 3 — электроды ускоряющей системы, 4 — щели, 5 — сетка, 6 — электронная камера, 7 — электронно-графическая пленка, 8 — траектории электронов.

К недостаткам прибора относятся неравномерность углового разрешения и резкое его снижение при углах больше  $60^\circ$  (рис. 7). Кроме того, функция распределения фотоэлектронов по энергии и углу вылета сложным образом связана с распределением интенсивности электронов на электронно-графической пластине, что значительно затрудняет обработку результатов.

Плоское зеркало использовалось также для проведения анализа по азимутальному углу вылета частиц [7, 16]. В схеме, которая называется «фонтанной», полый конусный пучок частиц, эмиттированных из образца, входит через кольцевое отверстие в нижней пластине в поле зеркала, отражается от верхней пластины и выходит через концентрическое кольцевое отверстие большего диаметра (рис. 8). Образец вынесен за пределы нижней пластины, и угол входа осевых траекторий пучка составляет с пластиной  $30^\circ$ , что обеспечивает фокусировку второго порядка на выходной щели, расположенной перед кольцевым детектором. Пространственное разрешение, обеспечиваемое детектором, определяет угловое разрешение метода. Недостатком рассмотренной системы является большой размер детектора.

Как энергоанализатор прибор может работать в режиме спектрометра или спектрографа. В последнем случае поверхность детектора должна совпадать с поверхностью изображения, которая приближенно имеет форму конуса. Ось его совпадает с осью симметрии анализатора, вершина лежит на нижней пластине (если источник также расположен на ней и вынесен только детектор), а угол при вершине равен  $158^\circ 12'$ . Следует иметь в виду, что в плоском зеркале, так же как и в других оптических системах, обладающих фокусировкой второго

порядка и отрицательным коэффициентом при абберационном члене третьего порядка, существует плоскость минимального сечения пучка (плоскость кроссовера), не совпадающая с плоскостью изображения. Она располагается ближе к источнику по ходу траектории, причем величина сдвига зависит от угла рас-

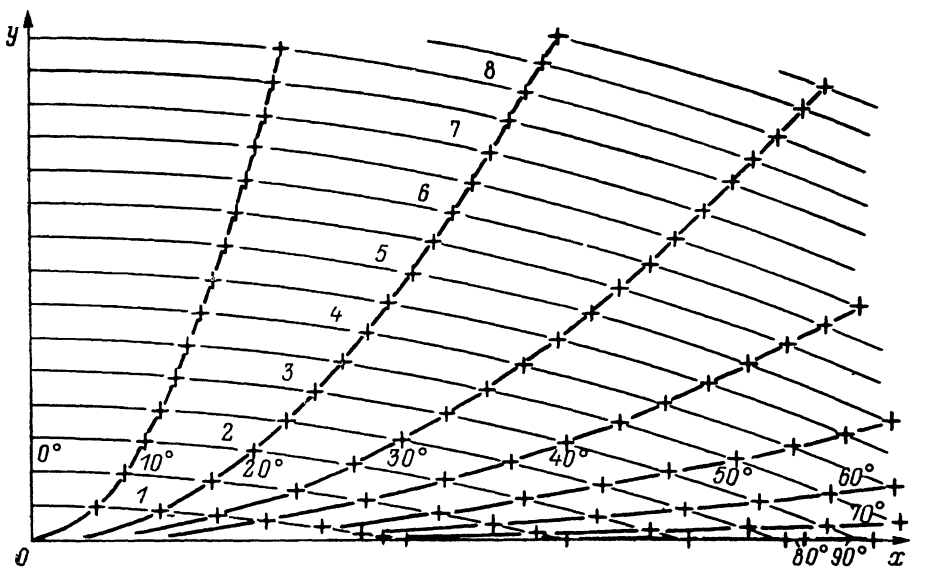


Рис. 7. Координаты пересечения электронов с сеткой в зависимости от их энергии и угла вылета из образца.

1 — 0.1, 2 — 0.3, 3 — 0.5, 4 — 0.7, 5 — 0.9, 6 — 1.1, 7 — 1.3, 8 — 1.5 эВ.

твора пучка. Совмещение выходной щели спектрометра с плоскостью минимального сечения позволяет повысить разрешение прибора.

Другим широко используемым анализатором является анализатор типа цилиндрического зеркала, который нашел также применение в электронной

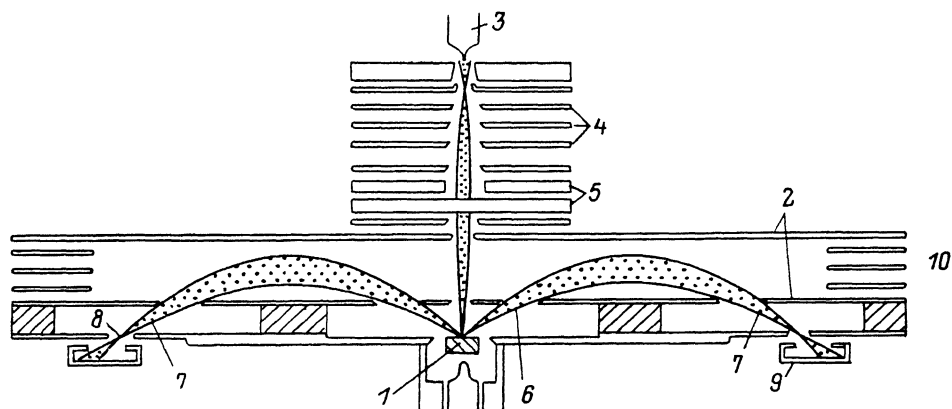


Рис. 8. Схема «фонтанного» анализатора.

1 — образец, 2 — пластины анализатора, 3 — электронная пушка, 4 — линза, 5 — отклоняющие электроды, 6 — входное кольцевое отверстие, 7 — выходное кольцевое отверстие, 8 — выходная кольцевая щель, 9 — детектор, 10 — охранные кольца, 11 — траектории пучка.

спектроскопии с угловым разрешением. Благодаря осевой симметрии он позволяет легко анализировать пучки по полному азимутальному углу  $2\pi$  при заданном значении полярного. При этом простейшим вариантом является использование условий фокусировки типа «ось—кольцо», когда частицы, выходящие из расположенного на оси источника, фокусируются на кольцевую щель. Очевидно, что каждой точке на этом кольце соответствует определенный угол вы-

дета из образца. Для регистрации спектра следует использовать позиционно-чувствительный детектор.

На рис. 9 изображена установка, описанная в работе [17]. С целью повышения дисперсии прибор составлен из двух последовательно расположенных цилиндрических анализаторов (на рис. 9 для простоты изображен только один). Они работают в идентичных режимах. Во входную щель каждого цилиндрического конденсатора направляется конический пучок электронов под углом  $42^\circ$  к оси, что обеспечивает фокусировку типа «ось—ось». Первому анализатору предшествует специальная осесимметричная линза, состоящая из шести цилиндрических электродов [18]. Она дает возможность снимать распределение не только по азимутальному, но и по полярному углу. Перестраивая электрические потенциалы на ее электродах, можно последовательно направлять во входную щель анализатора под углом  $42^\circ$  частицы, которые вылетают из образца в интервале полярных углов от  $20^\circ$  до  $70^\circ$ . Это позволяет проводить анализ в области, составляющей 60 % от полного телесного угла, равного  $2\pi$  ср. Наклоном образца диапазон исследуемых полярных углов можно расширить до нуля.

На выходе второго анализатора расположена еще одна осесимметричная линза специальной формы, цель которой ортогонализировать поток заряженных частиц на детектор и слегка подфокусировать его. Детектор состоит из двойной микроканальной пластины, усиливающей поток, за которой находятся отдельные аноды, расположенные по кольцу.

Угловое разрешение прибора в целом составляет  $7-8^\circ$  по азимутальному углу и  $5^\circ$  по полярному при размере источника 1,5 мм. Радиус внутреннего цилиндра анализатора 25 мм. Угловое разрешение самого анализатора примерно  $2^\circ$ , и его ухудшение

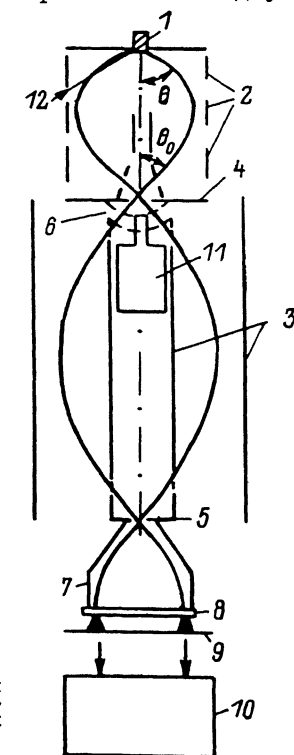


Рис. 9. Схема зеркального цилиндрического анализатора для углового анализа.

1 — образец; 2 — осесимметричная линза; 3 — электроды анализатора; 4 — входная щель; 5 — выходная щель; 6 — система, регулирующая входную энергию; 7 — ортогонализующая линза; 8 — микроканальные пластины; 9 — детектор; 10 — система обработки; 11 — электронная пушка; 12 — поток фотонов.

в приборе связано с наличием искажений, вносимых линзами и конечным размером анодов детектора.

Большая светосила и высокое энергетическое разрешение наряду с малыми размерами и простой формой электродов обеспечили цилиндрическому зеркалу широкое применение, в частности при исследовании поверхности. Однако, давая возможность легко получить полную информацию о распределении по азимутальному углу, такой анализатор не позволяет непосредственно исследовать распределение заряженных частиц по полярному углу. Помимо цитированной выше, имеется еще ряд работ, в которых исследуются не только азимутальные, но и полярные спектры с помощью модифицированных цилиндрических спектрометров [19-21]. В них используются специальные дополнительные устройства для вариации полярного угла в виде соосных с прибором отражающих конусов или отклоняющих цилиндров.

При анализе заряженных частиц высоких энергий в качестве спектрометров целесообразно использовать дефлекторы. По сравнению с рассмотренными выше зеркалами они обладают большей оптической силой, что объясняется лучшим облеганием пучка электродами системы. В то время как в зеркалах (и в системах с тормозящим полем) разность потенциалов на электродах близка к энергии частиц, здесь она в несколько раз меньше. Для исследования угловых характеристик может быть применен сферический дефлектор, поскольку он об-

ладает осевой симметрией. Такой прибор использовался при изучении ионизации электронным ударом методом совпадений [22].

Схематическое изображение установки дано на рис. 10. Анализатор образован двумя усеченными сферическими электродами, каждый из которых представляет собой  $90^\circ$ -ный сектор. В такой системе точечный источник и его изображение находятся на оси симметрии. Помещающая на входе диафрагму с кольцевой щелью, мы вырезаем конический пучок, который после прохождения анализатора фокусируется снова на ось, где помещена еще одна диафрагма с отверстием малого диаметра. Углы раствора конических пучков на входе и выходе составляют  $90^\circ$ . Через выходную диафрагму проходит моноэнергетический пучок, который затем регистрируется десятью детекторами, расположенными по кольцу. Относительное расположение пары детекторов, находящихся в точках  $A$  и  $B$  (рис. 10), определяет азимутальный угол  $\psi$ , исследуемый в данном эксперименте. Поскольку из десяти детекторов можно составить 45 пар, установка позволяет регистрировать одновременно 45 совпадений. Для исследования зависимости угловых распределений от энергии изменяется отношение разности потенциалов на электродах к энергии пучка.

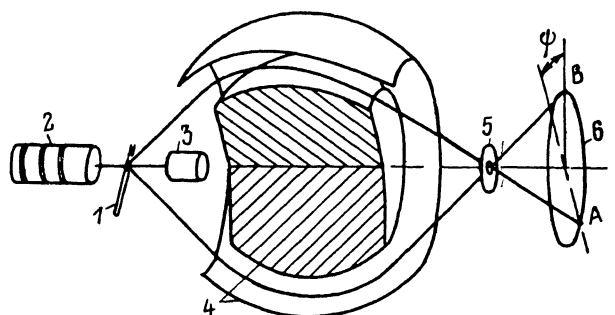


Рис. 10. Схематическое изображение сферического дефлектора.

1 — газовая мишень, 2 — электронная пушка, 3 — цилиндр Фарадея, 4 — электроды анализатора, 5 — выходная диафрагма, 6 — плоскость расположения детекторов.

Радиусы внутреннего и внешнего электродов равны соответственно 6.3 и 8.9 см. Краевые поля ограничиваются с помощью заземленных конических электродов с кольцевыми щелями. Сферические и краевые электроды изготовлены из алюминия и покрыты золотом. Поле Земли компенсируется с помощью катушек Гельмгольца; кроме того, вакуумная камера закрыта магнитным экраном.

До настоящего времени сферические дефлекторы не получили широкого распространения ввиду сложности изготовления и юстировки электродов. Кроме того, так же как и цилиндрическое зеркало, они дают возможность легко получить полную информацию о распределении по азимутальному углу, но не позволяют варьировать полярный угол.

В работе [23] описан тороидальный спектрометр, обеспечивающий одновременную регистрацию спектра в полном полярном угле при заданном значении азимутального. Захватываемый прибором пучок лежит в основном в одной плоскости  $\psi = \text{const}$  и имеет форму диска, толщина которого обусловлена небольшим разбросом по  $\psi$ . Схема прибора изображена на рис. 11. Его основной частью является анализатор с электродами тороидальной формы, на оси вращения которого ( $AB$ ) находится образец, причем заряженные частицы летят в плоскости, перпендикулярной оси  $AB$ . Через щель 3, расположенную перпендикулярно электродам, частицы входят в анализирующее поле по его эквипотенциальным поверхностям, т. е. прибор работает как дефлектор. На выходной щели 4 фокусируются частицы выделенной энергии и, таким образом, формируется моноэнергетическое кольцевое изображение с центром на оси. Благодаря осевой симметрии устройства полярный угол частиц сохраняется и каждой точке изображения соответствует его определенное значение.

В данном случае тороидальная призма используется необычным образом. В обычном тороидальном дефлекторе осевая траектория пучка лежит в плоскости, перпендикулярной оси тороида  $AB$  и проходящей через центр кривизны  $O$ . Эта траектория представляет собой окружность радиуса  $(r+a)$  и совпадает с главным нормальным сечением эквипотенциальной поверхности. Радиус кривизны второго главного нормального сечения этой поверхности постоянен вдоль всей траектории и равен  $r$ . В описываемом анализаторе траектории лежат в пло-

скостях, содержащих ось тороида. Осевые траектории, соответствующие каждой определенному значению полярного угла  $\theta$ , являются окружностями радиуса  $r$  и совпадают с одним из главных нормальных сечений эквипотенциальной поверхности. Радиус кривизны второго нормального сечения этой поверхности меняется вдоль траектории от бесконечности на входе до минимального значения, равного  $(r+a)$ , при угле поворота траектории  $\omega = \pi/2$ . Дальше он опять возрастает и достигает величины  $(r+a\sqrt{2})$  при  $\omega = 135^\circ$ . Поскольку оптические свойства определяются не только радиусом кривизны осевой траектории, но и формой эквипотенциальной поверхности, то два рассмотренных случая характеризуются разными условиями фокусировки и величиной дисперсии.

Были проведены численные расчеты для тороидального сектора с углом поворота  $\Phi_e = 135^\circ$  и расстоянием между электродами  $0.2r$ . На электроды пода-

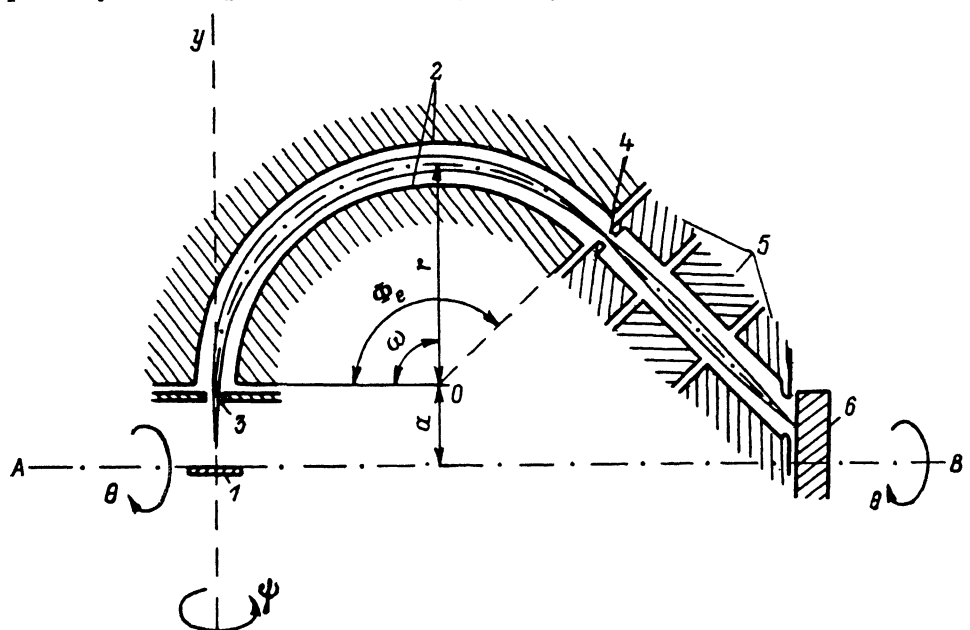


Рис. 11. Тороидальный секторный дефлектор с углом  $135^\circ$ .

1 — образец, 2 — электроды анализатора, 3 — входная щель, 4 — выходная щель, 5 — электроды конической линзы, 6 — детектор.

валось симметричное питание  $\pm V_0$ ; краевые поля ограничивались толстыми пластинами с кольцевыми щелями, находящимися под нулевым потенциалом. Было показано, что заряженные частицы фокусируются на краю поля, если  $r/a = 3.3$  и начальная энергия частиц составляет  $5.05eV_0$ . Дисперсия анализатора лежит примерно посередине между дисперсией цилиндрического дефлектора с  $\Phi_e = 127^\circ$  и полусферического дефлектора.

Для уменьшения размеров кольцевого изображения за анализатором соосно с ним располагается коническая осесимметричная линза, ось вращения которой совпадает с осью  $AB$ . Линза фокусирует пучок в кольцо меньшего диаметра на детекторе. Спектр по азимутальному углу в данном приборе можно получить, вращая образец вокруг оси, перпендикулярной  $AB$ . Энергетическое распределение также снимается последовательно во времени.

Описанный анализатор имеет следующие характерные размеры: радиус кривизны осевой траектории  $r = 50$  мм, расстояние от образца до входной щели 15 мм. При ширинах щелей 0.5 мм и угле раствора пучка  $\Delta\psi = \pm 2^\circ$  получено энергетическое разрешение 1.3 %, при изменении геометрии его можно повысить до 1 %. Достигнуто угловое разрешение менее  $2.6^\circ$ .

Достоинством прибора является наличие достаточного свободного пространства в области образца. Недостатки его заключаются в сложной форме электродов и неортогональном (под углом  $45^\circ$ ) падении заряженных частиц на детектор.

Использование аналогичного тороидального анализатора в экспериментах по резерфордскому рассеянию описано в работах [24, 25]. Исследовалось угловое распределение рассеянных на поверхности монокристаллов ионов. Схема установки дана на рис. 12. Параллельный моноэнергетический пучок ионов, обычно протонов, с энергией от 50 до 200 кэВ падает на поверхность образца, и отраженные ионы в интервале углов  $20^\circ$  попадают во входную щель анализатора. Угол отклонения частиц в анализаторе составляет  $90^\circ$ , при этом на выходе все осевые траектории параллельны друг другу и поэтому попадают на детектор нормально к его поверхности. Это особенно существенно в данном случае, когда энергия ионов велика и ортогонализация с помощью ускорения затруднена.

Фокусировка частиц осуществляется на кольцевой щели, расположенной на некотором расстоянии от края поля.

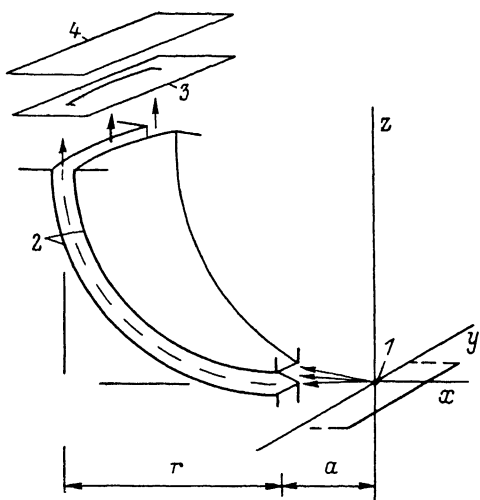


Рис. 12. Тороидальный секторный дефлектор с углом  $90^\circ$ .

1 — образец, 2 — электроды анализатора, 3 — входная щель, 4 — детектор.

Отношение расстояния от входа в поле до оси тороида  $a$  к радиусу кривизны средней эквипотенциали составляет 0.48. Основные размеры устройства таковы: меньший радиус кривизны эквипотенциали 20 см, расстояние между электродами 1.2 см, ширина входной щели 1.35 мм. В приборе получено энергетическое разрешение 0.4 %, угловое разрешение 0.2 %.

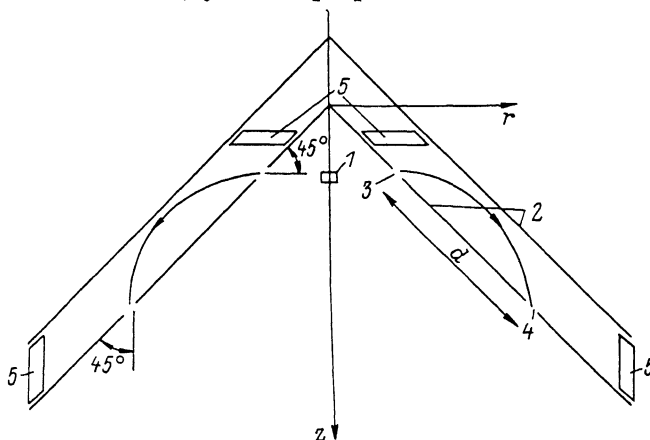


Рис. 13. Схематическое изображение конического анализатора.

1 — образец, 2 — электроды анализатора, 3 — входная кольцевая щель, 4 — выходная щель, 5 — кольцевые электроды для компенсации краевых эффектов.

Угловой анализ дисковых пучков можно проводить также с помощью других типов осесимметричных анализаторов, в частности с электродами конической формы, конструктивно более простой. Такие анализаторы были рассмотрены в [26] в режиме работы «на прострел». В работе [27] описан конический спектрометр, предназначенный для проведения углового анализа заряженных частиц. Принципиальная схема прибора дана на рис. 13. Анализатор образован двумя соосными коническими поверхностями с одинаковым углом раствора, равным  $90^\circ$ . Образец расположен на оси, а пучок анализируемых частиц движется в основном перпендикулярно оси. Он входит в кольцевую щель, отражается от

внешнего электрода и выходит через вторую кольцевую щель соответственно большего радиуса. Таким образом, система работает как зеркало. Угол поворота частиц в системе примерно равен  $90^\circ$ , поэтому частицы выходят параллельно оси и ортогонально падают на детектор. Для того чтобы уменьшить размеры конуса и скорректировать краевые эффекты, по обе стороны от входной и выходной щелей располагаются дополнительные кольцевые электроды, на которые подается некоторый промежуточный потенциал.

Для определения параметров анализатора проводился численный расчет распределения потенциала в пространстве между двумя конусами, ограниченном на краях кольцевыми электродами. Потенциал кольцевых электродов равнялся среднему арифметическому от потенциалов конусов. Траектории в полученном поле также определялись численно. В результате были рассчитаны дисперсия, абберации и разрешающая способность прибора. Было показано, что его параметры близки к параметрам плоского конденсатора. В частности, угол входа частиц в поле, при котором происходит фокусировка в плоскости дисперсии, близок к  $45^\circ$  ( $44.7^\circ$ ), если источник и изображение расположены на нижнем электроде. Дисперсия конического анализатора на 7—8 % больше дисперсии плоского зеркала. На основе описанной схемы был создан прибор для исследования упругого и неупругого рассеяния электронов. Он состоит из двух частей: монохроматора, формирующего первичный пучок, и собственно анализатора рассеянных электронов. Обе эти функции осуществляются одними и теми же коническими электродами, при этом в качестве монохроматора используется сектор с угловым размером  $100^\circ$ , а в качестве анализатора — сектор в  $260^\circ$ .

Первичный пучок, создаваемый электронной пушкой, идет параллельно оси  $z$  и попадает в монохроматор под углом  $45^\circ$  к его электродам. Левую часть устройства (рис. 13) можно рассматривать как монохроматор, если направление траектории изменить на обратное. Пучок выходит из поля перпендикулярно оси  $z$ , ускоряется и облучает мишень. Рассеянные электроны перед попаданием в анализатор проходят через дисковые трансаксиальные линзы, назначение которых состоит в замедлении электронов до энергии настройки анализатора и фокусировке их на входную кольцевую щель. Прибор делит электроны по энергии, сохраняя полярный угол, под которым они вылетают из мишени.

В данном устройстве используется подвижный детектор, помещенный за выходной щелью. Он перемещается вдоль кольцевой щели и последовательно регистрирует частицы с разными значениями полярного угла. Для повышения эффективности работы прибора целесообразно использовать кольцевой детектор, например, на основе микроканальных пластин, который осуществляет одновременную регистрацию всего углового спектра.

Параметры спектрометра таковы: максимальный радиус внешнего конуса 120 мм, минимальный 75 мм, расстояние между электродами 19 мм, расстояние между входной и выходной щелями 51.9 мм. Разрешаемый интервал энергий при ширинах щелей 0.5 мм равен 85 мэВ, энергия настройки 6 эВ, угловое разрешение анализатора порядка  $4^\circ$ .

Аналогичный анализатор исследован в работе [28]. Распределение поля между конусами в адиабатическом приближении получено в аналитическом виде. Это позволяет определять траектории заряженных частиц с достаточной точностью на расстоянии от вершины конуса, примерно в 10 раз превышающем расстояние между электродами. Траектории рассчитывались численно для различных углов раствора конусов при сохранении параллельности их образующих. Найдено, что, если источник и приемник расположены на внутреннем электроде, угол фокусировки меняется от  $45.2$  до  $47.5^\circ$  при изменении углов раствора от  $140$  до  $40^\circ$  (отношение энергии электронов к потенциалу на внешнем электроде было фиксировано и составляло 1.2). Был создан и испытан макет анализатора с углом раствора  $60^\circ$  и базой 23.75 мм. Совпадение экспериментальных величин с теоретическими хорошее.

Параметры прибора изменяются, если его изготавливать из конусов с разными углами раствора. В работе [29] рассчитан анализатор, образованный двумя коническими электродами с общей вершиной. На основе известного распределения потенциала было получено приближенное выражение для траектории, записывающееся в аналитическом виде. Найдено условие фокусировки

первого порядка для кольцевых источника и приемника, расположенных на внутреннем электроде. Дисперсия в этом случае растет с увеличением разности углов раствора конусов при направлении пучка в область более слабого поля, однако одновременно возрастает и увеличение.

Сравнивая рассмотренные типы спектрометров для углового анализа пучков заряженных частиц, можно сделать вывод, что следует отдать предпочтение схемам, не имеющим механически перемещаемых частей. Схемы с задерживающим потенциалом обеспечивают возможность измерений в большом телесном угле (до  $2\pi$  ср), однако характеризуются малым отношением сигнал—шум. Анализаторы, обладающие дисперсией, очень разнообразны, и выбор между ними должен определяться требованиями эксперимента. Например, для анализа частиц высоких энергий рекомендуется использовать дефлекторы, а не зеркала. Немалое значение имеет технологичность системы (простота изготовления и юстировки), а также ее компактность. С этой точки зрения для исследования распределений заряженных частиц по азимутальному углу предпочтительно использовать цилиндрическое зеркало, а для изучения распределений по полярному углу — конический анализатор.

### Литература

- [1] Черепин В. Т., Васильев М. А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Киев: Наукова думка, 1982, с. 400.
- [2] Нефедов В. И., Черепин В. Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983, с. 296.
- [3] Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А. и др. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1971, с. 493.
- [4] Козлов И. Г. Методы энергетического анализа электронных потоков. М.: Атомиздат, 1971. 190 с.
- [5] Афанасьев В. П., Явор С. Я. ЖТФ, 1975, т. 45, № 6, с. 1137—1170.
- [6] Афанасьев В. П., Явор С. Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978. 224 с.
- [7] Ballu J. High Resolution Electron Spectroscopy in Applied Charged Particle Optics, ed. by A. Septier, Adv. in Electronics and Electron Phys., Suppl. 13B. N. Y.; London: Acad. Press, 1980, p. 257—381.
- [8] Weeks S. P., Rowe J. E. et al. Rev. Sci. Instr., 1979, v. 50, N 10, p. 1249—1255.
- [9] Eastmann D. E., Donelon J. J. et al. Nucl. Instr. Meth., 1980, v. 172, N 1—2, p. 327—336.
- [10] Баранова Л. А., Явор С. Я. Электростатические электронные ливзы. М.: Наука, 1986, с. 190.
- [11] Пронин И. И., Гомоюнова М. В., Бернацкий Д. П. и др. ПТЭ, 1982, № 1, с. 175—178.
- [12] Афанасьев В. П., Явор С. Я. Письма в ЖТФ, 1975, т. 1, № 17, с. 779—783.
- [13] Голыков Ю. К., Иванов В. Г., Коломенков В. Ю., Матышев А. А. ЖТФ, 1981, т. 51, № 5, с. 1010—1012.
- [14] Баранова Л. А., Дьякова Г. Н., Явор С. Я. ЖТФ, 1987, т. 57, № 6, с. 1109—1113.
- [15] Pauty F., Matula G., Vernier P. J. Rev. Sci. Instr., 1974, v. 45, N 10, p. 1203—1207.
- [16] Schmitz W., Melhorn W. J. Phys. E: Sci. Instr., 1972, v. 5, N 1, p. 64—68.
- [17] Van Hoof H. A., Van der Wiel M. J. J. Phys. E: Sci. Instr., 1980, v. 13, N 4, p. 409—414.
- [18] Van Hoof H. A. J. Phys. E: Sci. Instr., 1981, v. 14, N 3, p. 325—329.
- [19] Огурцов Г. Н., Флак И. П., Авакян С. В. ЖТФ, 1969, т. 39, № 7, с. 1293—1301.
- [20] Vassilev G., Bandon J., Rahmat G., Barrat M. Rev. Sci. Instr., 1971, v. 42, N 8, p. 1222—1227.
- [21] Baudais F. L., Taylor J. M. J. Electron Spectros. Relat. Phenom., 1980, v. 18, N 1, p. 85—89.
- [22] Moore J. H., Coplan M. A., Skillman T. L., Brooks E. D. Rev. Sci. Instr., 1978, v. 49, N 4, p. 463—468.
- [23] Engelhardt H. A., Back W., Menzel D. Rev. Sci. Instr., 1981, v. 52, N 6, p. 835—839.
- [24] Saris F. W. Nucl. Instr. Meth., 1982, v. 194, N 3, p. 625—632.
- [25] Smeenk R. G., Tromp R. M. et al. Nucl. Instr. Meth., 1982, v. 195, N 3, p. 581—586.
- [26] Осаянникова Л. П., Явор С. Я. ЖТФ, 1978, т. 48, № 6, с. 1306—1308.
- [27] Brewer D. F. C., Newell W. R., Smith A. C. H. J. Phys. E: Sci. Instr., 1980, v. 13, N 1, p. 114—127.
- [28] Никифоров И. Я., Казаков А. Т., Рабинович М. Н. Изв. вузов. Физика, 1981, т. 24, № 10, с. 35—40.
- [29] Баранова Л. А., Дьякова Г. Н., Явор С. Я. ЖТФ, 1988, т. 58, № 1, с. 207—210.