
**ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

УДК 535.316 / 317

© В. Д. Белов

ИММЕРСИОННЫЕ ЛИНЗЫ В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СФЕРИЧЕСКОГО СЕКТОРНОГО ДЕФЛЕКТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования энергоанализирующих систем, использующих в сочетании полые электростатические линзы и различные конфигурации аксиально-симметричного секторного сферического дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка, образующих системы вида ось—ось, ось—кольцо, кольцо—ось, кольцо—кольцо. Показано, что сочетание полых иммерсионных линз с системами сферического дефлектора с фокусировкой второго порядка обеспечивает высокую эффективность этих систем в спектроскопии заряженных частиц высокого энергетического разрешения. Разделение частиц по энергии происходит в дефлекторе, где энергия частиц минимальна и релятивистское смещение траекторий отсутствует, благодаря чему шкала энергий спектрометра абсолютно линейна и ее погрешность определяется только погрешностью управляющих электростатических потенциалов. На основе исследованных систем возможно построение компактных светосильных спектрометров, обладающих разрешающей силой по энергии в диапазоне от нескольких сотен до десятков тысяч.

ВВЕДЕНИЕ

В аксиально-симметричных системах в силу симметрии электростатического поля сферический дефлектор, обеспечивающий фокусировку в аксиальной плоскости [1], также как и анализатор на основе цилиндрического зеркала (ЦЗА) [2, 3], обладает свойствами двойной, или пространственной фокусировки. Однако в классическом исполнении сферический дефлектор [4] имеет меньшую по сравнению с ЦЗА светосилу вследствие первого порядка фокусировки по угловым направлениям в плоскости аксиальной симметрии.

В работе [5] было показано, что в секторном сферическом дефлекторе в результате действия на движение заряженных частиц провисающего на краях межэлектродного зазора электростатического поля можно получить фокусировку второго порядка по угловым направлениям. Это свойство дает возможность существенно увеличить угловую апертуру пучков частиц и получить при заданной величине энергетического разрешения значительно большее пропускание и светосилу, чем при фокусировке первого порядка. Последнее обстоятельство особенно важно для спектроскопии фотоэлектронов низких энергий в условиях эксперимента, когда мало количество анализируемого вещества на поверхности или низка интенсивность фотонного пучка, облучающего исследуемую пробу.

В настоящей работе представлена часть результатов компьютерного моделирования, дающих общее представление о свойствах энергоанализирующих систем на основе сочетания полых акси-

ально-симметричных электростатических линз с различными конфигурациями секторного сферического дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка. Исследование этих систем предпринято с целью выяснения возможности их применения в энергоанализаторах заряженных частиц высокого разрешения.

ИММЕРСИОННЫЕ ЛИНЗЫ В СИСТЕМАХ С ФОКУСИРОВКОЙ ВИДА ОСЬ—ОСЬ, КОЛЬЦО—ОСЬ ИЛИ ОСЬ—КОЛЬЦО

Для иллюстрации свойств новых систем применена модель, аналогичная в части соотношений геометрических размеров и режимных параметров использованной в работе [5]. На рис. 1, а показан электростатический энергоанализатор в виде центрально-симметричного сектора сферического конденсатора с вводом частиц вдоль эквипотенциальных поверхностей поля средней части межэлектродного зазора в плоскости меридионального сечения, проходящей через источник S_1 и центр сфер O . Модель энергоанализатора близка к классической схеме. Обкладки конденсатора удалены от средней между сферическими обкладками конденсатора поверхности радиуса r_0 ; межэлектродный зазор равен $4/9 r_0$; соответственно $r_2 = 11/9 r_0$, $r_1 = 7/9 r_0$. Точечный источник расположен в свободной от поля области на оси аксиальной симметрии системы в позиции S_1 . Электростатическое поле, локализовано в пределах секторного угла, равного 90° . Источник создает

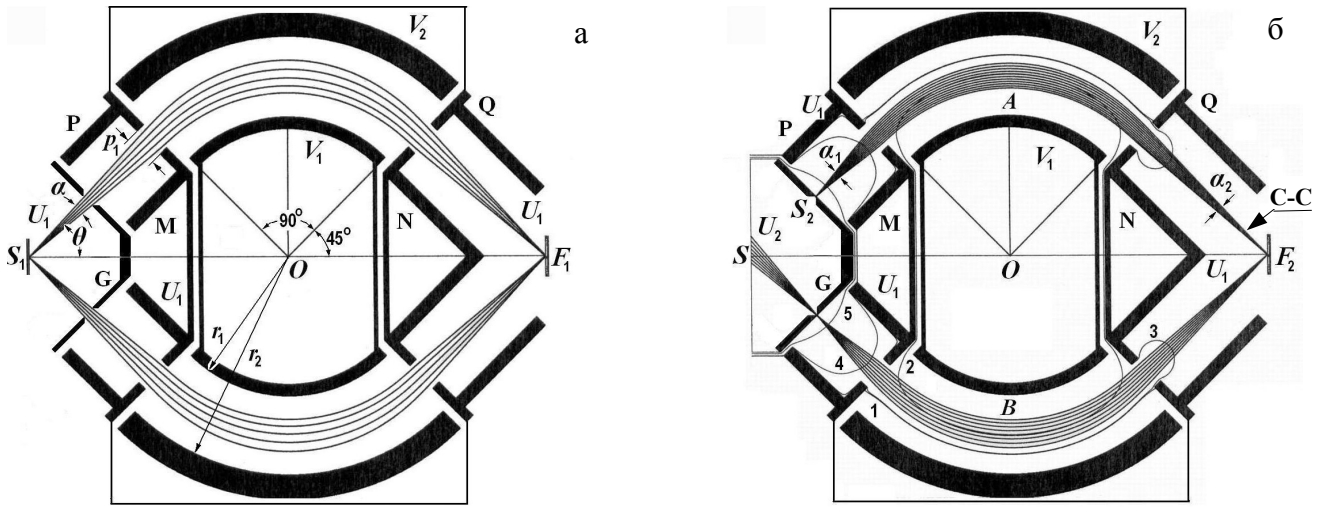


Рис. 1. Энергоанализирующие системы на основе аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с фокусировкой вида ось—ось (а) и кольцо—ось (б).

а — энергоанализатор с пространственной фокусировкой второго порядка; радиусы сферических поверхностей внешнего и внутреннего электродов дефлектора $r_2 = 55$ мм, $r_1 = 35$ мм; потенциалы на электродах $V_2 = -5.5$ В, $V_1 = +9$ В; потенциал U_1 на корректирующем поле дефлектора конических электродах Р—М, Q—N и G равен -3 В; p_1 — полный зазор в конических электродах Р—М, Q—N; S_1 , F_1 — положения точечного источника и фокуса пучка на оси системы; полный угловой раcтвор пучка α равен 8° ; главная ось пучка составляет с осью аксиальной симметрии системы угол θ , равный 46.6° ; "плечи" дефлектора F_1O и OS_1 одинаковы по длине и равны 65 мм; кинетическая энергия W_1 однозарядных частиц, движущихся по траекториям, равна 12.2 эВ.

б — конфигурация сферического дефлектора с иммерсионной линзой на входе, образуемой в зазоре между коническим электродом G с кольцеобразной диафрагмой S_2 под потенциалом $U_2 = +60$ В и корректирующими коническими электродами Р—М с потенциалом $U_1 = -3$ В; контуры эквипотенциалов с индексами 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям потенциалов $-3, 0, -2.95, 0, +35$ В; А — группа траекторий частиц, исходящих из кольцеобразного источника S_2 в коническом электроде G, с фокусами второго порядка в позиции F_2 на оси системы; главная ось пучка составляет с осью аксиальной симметрии системы угол $\theta = 45^\circ$; угол раствора расходящегося пучка α_1 равен 11° ; угол раствора сходящегося пучка α_2 равен 7° ; кинетическая энергия однозарядных частиц при движении из источника S_2 $W_{2S} = 75.2$ эВ; энергия частиц в фокусе F_2 на оси системы $W_{2F} = 12.2$ эВ; В — группа траекторий однозарядных частиц с кинетической энергией $W_{2F} = 12.2$ эВ. C-C — вид фрагментов пучков частиц группы траекторий А, изображенных на (б), в области фокуса второго порядка F_2 с энергиями, отличающимися на 0.05 эВ

расходящийся пучок частиц с углом полураствора $\alpha / 2$. Главная ось пучка составляет с осью аксиальной симметрии системы угол θ . Ввод и вывод частиц производится через открытый в эквипотенциальном пространстве зазор p_1 между коническими электродами Р—М, Q—N, служащими для коррекции краевого поля конденсатора и ограничения угловой апертуры пучка. При наличии на обкладках конденсатора разнополярных потенциалов — отклоняющего частицы V_2 и притягивающего V_1 — и на ограничивающих краевое поле дефлектора электродах Р—М, Q—N потенциала

U_1 со значениями в интервале $V_2 < U_1 < V_0$, где V_0 — потенциал на средней между сферическими обкладками поверхности радиуса r_0 , в системе могут быть реализованы условия для пространственной фокусировки второго порядка. Такие условия возникают, если энергия частиц, эмитируемых точечным источником с оси аксиальной симметрии системы, меньше кинетической энергии частиц $W_1 = qU_1$, движущихся по круговым орбитам в идеальном центрально-симметричном поле (U_1 — потенциал поля, соответствующий энергии частиц).

Для удобства представления результатов и характеристики устройств во всех рассматриваемых системах геометрические размеры основных элементов дефлектора и потенциалов на них имеют следующие значения: радиусы сферических поверхностей внешнего и внутреннего электродов дефлектора $r_2 = 55$ мм, $r_1 = 35$ мм; потенциалы на сферических электродах дефлектора для энергоанализа отрицательно заряженных частиц $V_2 = -5.5$ В, $V_1 = +9$ В; потенциал U_1 на корректирующем поле дефлектора конических электродах **P—M**, **Q—N** и **G** равен -3 В.

В системе на рис. 1, а пространственная фокусировка второго порядка вида ось—ось имеет место при энергии однозарядных частиц $W_1 = 12.2$ эВ. Полный угловой раствор пучка $\alpha = 8^\circ$; главная ось пучка составляет с осью аксиальной симметрии системы угол $\theta = 46.6^\circ$; "плечи" дефлектора F_1O и OS_1 одинаковы по длине и равны 65 мм.

В нерелятивистском случае при пропорциональном изменении потенциалов и энергии частиц их траектории остаются неизменными; также как и при перемещении источника в положение F_1 фокусы второго порядка будут формироваться в позиции S_1 с теми же aberrациями и дисперсией по энергии. Если в системе, показанной на рис. 1, а, на электроде **G**, ограничивающем угловую апертуру пучка, установить величину потенциала U_2 меньше или больше U_1 , разность потенциалов $U_2 - U_1$ в зазоре между электродами **P—M** и **G** создаст иммерсионную линзу, в поле которой будет происходить торможение или ускорение частиц. При этом кроссовер фокуса второго порядка будет смещаться в сторону электрода **G** с потенциалом U_2 . Результат таких изменений показывает рис. 1, б, на котором изображена энергоанализирующая система с фокусировкой вида кольцо—ось, построенная на основе центрально-симметричного 90° сферического дефлектора с иммерсионной линзой на входе, образуемой в зазоре между электродами **P—M** и коническим электродом **G** с щелевой кольцеобразной диафрагмой S_2 при потенциале на этом электроде $U_2 = +60$ В. Группа A траекторий частиц, исходящих из кольцеобразного источника S_2 в коническом электроде **G**, образует фокус второго порядка в позиции F_2 на оси системы. Начальная кинетическая энергия W_{2S} однозарядных частиц, движущихся по траекториям из источника S_2 , равна 75.2 эВ. При торможении в поле иммерсионной линзы кинетическая энергия частиц W_{2F} уменьшается и на выходе из системы в фокусе F_2 равна 12.2 эВ. В результате более чем шестикратного изменения энергии системе свойственно большое оптическое увеличение, угловое уменьшение и высокая дисперсия по энергии. Стартующий из источника S_2 расходящийся пучок с первоначальным угловым раствором α_1 , равным 11° ,

преобразуется в сходящийся с угловым раствором α_2 , равным 7° .

Дисперсию по энергии системы с иммерсионной линзой на входе характеризуют изображения на рис. 1, б (С-С) фрагментов траекторий частиц в области фокусов второго порядка F_2 с начальными кинетическими энергиями, отличающимися на 0.05 эВ.

На рис. 2, а приведены графики функции прилета пучков, показанных на рис. 1, б, позволяющие оценить параметры качества фокусировки системы с фокусировкой вида кольцо—ось. Графики функций для пучков частиц с различиями по энергии 0.05 эВ по оси Y построены в масштабе, соответствующем цене одного деления 0.1 мм. Функции имеют вид, характерный для фокусировки

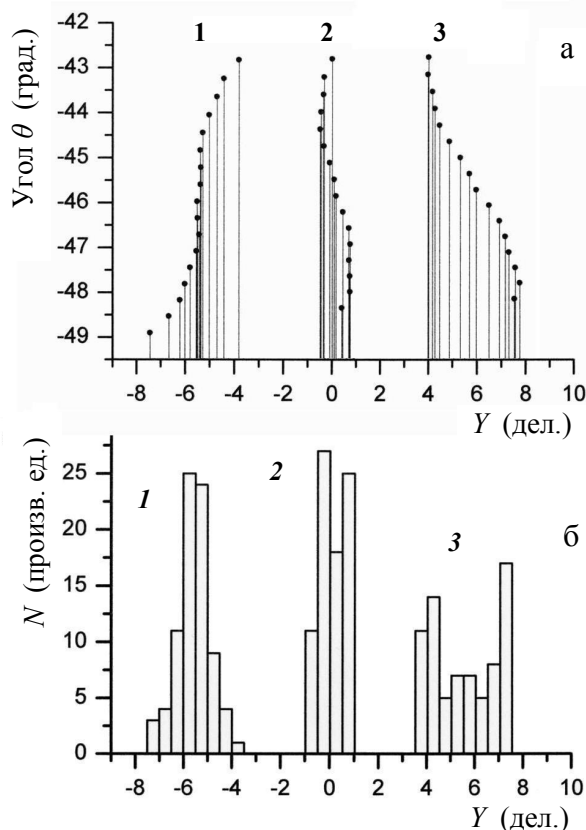


Рис. 2. Графики, характеризующие функции прилета пучков 1, 2, 3 (рис. 1, б, вид С-С) с фокусировкой второго порядка, и соответствующие им гистограммы сигналов.

а — графики 1, 2, 3 соответствуют пучкам в позиции F_2 на рис. 1, б с начальными кинетическими энергиями, отличающимися на 0.05 эВ; б — гистограммы 1, 2, 3 характеризуют видоизменения формы сигналов от пучков разных энергий при дискретности координатно-чувствительного детектора 0.05 мм

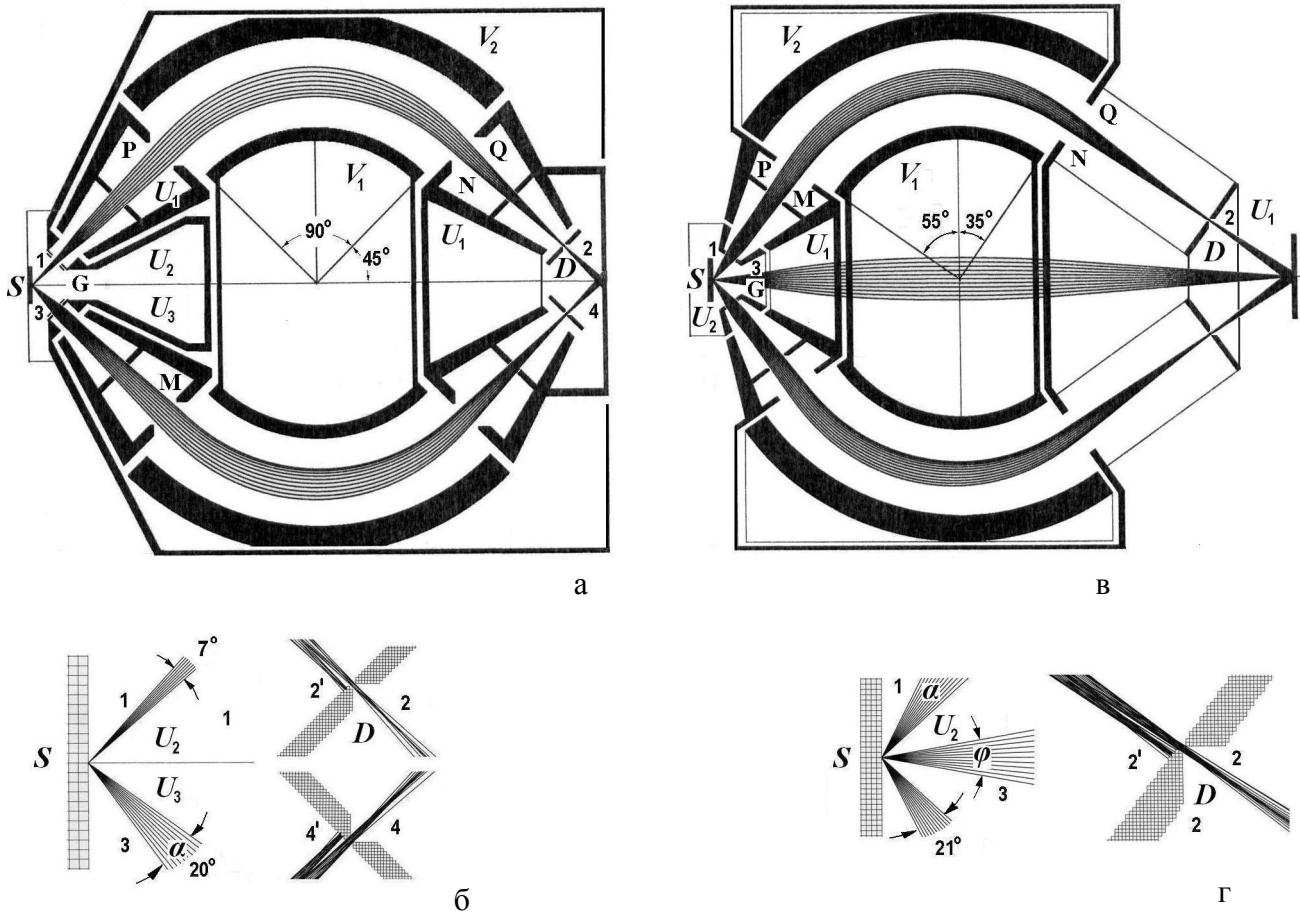


Рис. 3. Энергоанализирующие системы на основе аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с фокусировкой вида ось—кольцо.

а — энергоанализатор на основе секторного 90° центрально-симметричного сферического дефлектора с видоизмененной иммерсионной линзой на входе системы; верхняя часть рисунка (над осью аксиальной симметрии системы) соответствует схеме анализатора с иммерсионной линзой, образованной коническим электродом **G** (см. рис. 1) с потенциалом $U_2 = +17$ В и корректирующими коническими электродами **P—M** с потенциалом $U_1 = -3$ В, которая формирует в зазоре между электродами линзы поле, тормозящее частицы; в нижней части схемы линза, образуемая коническим электродом **G** с потенциалом $U_3 = -9.6$ В и корректирующими коническими электродами **P—M** с потенциалом $U_1 = -3$ В, создает поле, ускоряющее частицы.

б — вид фрагментов траекторий, характеризующих движение частиц на входе и выходе системы, изображенной на рис. 3, а: траектории групп 1 и 3 показывают начальные угловые направления движения частиц, для которых осуществляется пространственная фокусировка пучка второго порядка в кольцо (группы 2 и 2', 4 и 4') на поверхности выходной щелевой диафрагмы **D**; траектории в группах 1, 2, 2' характеризуют фокусирующие свойства системы при работе линзы в режиме торможения; траектории в группах 3, 4 и 4' характеризуют фокусировку при работе линзы в режиме ускорения; группы 2' и 4' соответствуют частицам, энергия которых на 0,05 эВ меньше энергии частиц в группах 2 и 4;

в — конфигурация дефлектора с иммерсионной линзой на входе, образованной коническим электродом **G** с потенциалом $U_2 = -10.2$ В и корректирующими коническими электродами **P—M** с потенциалом $U_1 = -3$ В; поле в зазоре между электродами линзы ускоряет частицы; образующие конической поверхности, задающей внешние границы секторного дефлектора, со стороны точечного источника **S** наклонены к оси аксиальной симметрии системы под углом 35°.

г — вид фрагментов траекторий, характеризующих движение частиц в системе, изображенной на (в); траектории группы 1 отображают начальные угловые направления движения, для которых на выходе из системы существует пространственная фокусировка второго порядка (группы 2 и 2') при работе линзы в режиме ускорения; группа 3 отображает проекции на плоскость рисунка траекторий частиц при движении по азимутальным угловым направлениям φ ; группа 2' соответствует частицам, энергия которых на 0,05 эВ меньше энергии частиц в группе 2; начальная кинетическая энергия частиц группы 2 равна 4,69 эВ, конечная энергия — 11,9 эВ; начальным направлениям движения соответствуют углы по отношению к оси системы в интервале 43–64°

второго порядка и показывают возможность достижения в системе разрешающей силы по энергии порядка 1000 при условии малости линейных размеров апертурной щели источника. Построенные по приведенным функциям гистограммы сигналов (при дискретности координатно-чувствительного детектора 0.05 мм) на рис. 2, б характеризуют видоизменения формы сигнала от энергий частиц и позволяют найти режимы настройки системы на максимальное энергетическое разрешение. По виду фокусировки система аналогична энергоанализатору "цилиндрическое зеркало" с фокусировкой кольцо—ось [2], построенному автором для исследований поверхности с помощью метода спектроскопии Оже-электронов [6, 7].

Сравнение этих систем показывает, что благодаря наличию предварительного торможения частиц и отсутствию сеток на их пути новая система имеет ряд преимуществ по отношению к аналогу при анализе электронных пучков высокой энергии. Она позволяет минимизировать влияние на разрешение по энергии релятивистского сдвига шкалы энергий (существенного при энергии электронов более 500 эВ) и вторичных эффектов, связанных с взаимодействием электронов с элементами конструкции.

Применение входной иммерсионной линзы с измененной геометрией конических электродов Р—М и G, показанной на рис. 3, а, реализует в системе с точечным источником на оси условия для пространственной фокусировки второго порядка вида ось—кольцо. В зависимости от значений потенциалов на полеобразующих электродах линзы в модифицированной схеме могут быть обеспечены два режима работы спектрометра при неизменной геометрии системы: анализ частиц высокой энергии при их торможении и анализ частиц малой энергии при ускорении в поле иммерсионной линзы на входе в дефлектор. Вид пучков частиц, пропускаемых системой, и фрагменты их траекторий, соответствующие режимам работы спектрометра с торможением и ускорением частиц, показаны на рис. 3, а, б. Изображения траекторий в верхней части рисунков над осью аксиальной симметрии характеризуют систему в режиме торможения, в части рисунков ниже оси вид траекторий отражает специфику режима ускорения частиц.

Особенностью режима ускорения является возможность значительного повышения светосилы системы, величина которой может составлять 25–30 % от 2π стерадиан за счет большего апертурного угла пучка частиц, воспринимаемого системой. Этой системе свойственно оптическое уменьшение и соответственно меньшие аберрации и дисперсия по энергии. Хотя системы обладают различными оптическими свойствами (система

с ускорением увеличивает светосилу, но уменьшает дисперсию; система с торможением увеличивает дисперсию по энергии), их сочетание в комбинированной схеме спектрометра (танDEM из каскадов с ускорением и торможением) может дать выигрыш, как в светосиле, так и в разрешении по энергии.

Для анализа пучков с углами вылета более 45° между начальными направлениями движения и нормалью к поверхности источника S может быть применена видоизмененная конфигурация аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с иммерсионной линзой на входе, показанная на рис. 3, в. В модифицированной схеме образующие конической поверхности, задающей внешние границы секторного дефлектора, со стороны точечного источника S наклонены к оси аксиальной симметрии системы под углом 35° ; поле в зазоре между электродами линзы ускоряет частицы. Светосилу и дисперсию по энергии характеризуют изображения на рис. 3, г фрагментов траекторий в области источника S и выходной кольцеобразной диафрагмы D. При заданной геометрии системы начальным направлениям движения соответствуют угловые направления по отношению к оси системы в интервале от 43 до 64° .

ИММЕРСИОННЫЕ ЛИНЗЫ В СИСТЕМАХ С ФОКУСИРОВКОЙ ВИДА КОЛЬЦО—КОЛЬЦО

Возможность получить информацию об эмиссионных свойствах поверхности с большой площади поверхности образца является свойством систем с фокусировкой вида кольцо—ось [6]. Системы с фокусировкой вида кольцо—кольцо в этом качестве могут быть более эффективными, например, при использовании для регистрации пространственных распределений частиц координатно-чувствительных детекторов. На рис. 4, а представлена схема энергоанализирующей системы на основе аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка вида кольцо—кольцо. Условия для фокусировки второго порядка реализуются при положениях точечного источника на оси системы, представляющей собой образующую конической поверхности с центром, совмещенным с центром сферических электродов дефлектора. Образующая конуса при выбранной геометрии системы составляет с осью аксиальной симметрии системы угол, равный 18° . При кинетической энергии W_1 однозарядных частиц, равной 12.2 эВ, их траектории сходятся в фокусе на этой же оси в положении D_0 , симметричном относительно центра сфер положению источника. Характерной особенностью рассматриваемой системы является

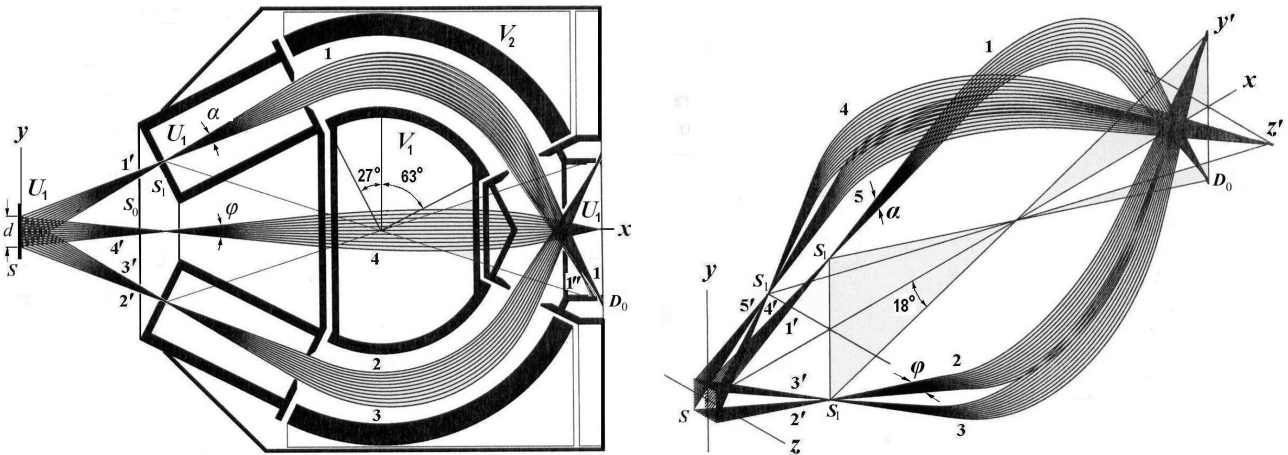


Рис. 4. Энергоанализирующая система на основе аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с фокусировкой вида кольцо—кольцо.

а — энергоанализатор с пространственной фокусировкой второго порядка; потенциалы на электродах системы $V_2 = -5.5$ В, $V_1 = +9$ В; потенциал U_1 на корректирующих поле дефлектора электродах **Р—М**, **Q—N**, **G** и **J** равен -3 В; S_1 , D_0 — положения точечного источника и фокуса пучка на оси системы, представляющей собой образующую конической поверхности с центром, совмещенным с центром сферических электродов дефлектора, образующая конуса составляет с осью аксиальной симметрии системы угол 18° ; полный угловой раствор пучка α равен 10° ; главная ось пучка составляет с осью аксиальной симметрии системы угол 25.7° ; кинетическая энергия W_1 однозарядных частиц, движущихся по траекториям с источником и фокусом на общей оси, равна 12.2 эВ; **1'—1**, **2'—2**, **3'—3**, **4'—4** — группы траекторий однозарядных частиц с кинетической энергией на входе в анализатор 12.2 эВ; группа **4'—4** представляет собой проекции траекторий частиц, движущихся по азимутальным направлениям с углом раствора φ относительно плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка; фрагменты траекторий с индексом **1''** характеризуют дисперсию системы по энергии и соответствуют частицам с кинетической энергией на 0.2 эВ меньше энергии частиц в группе **1**; кольцеобразные диафрагмы S_0 , S_1 служат для ограничения угловой апертуры воспринимаемого системой пучка частиц, эмитируемых источником S .

б — трехмерное изображение траекторий однозарядных частиц с кинетической энергией 12.2 эВ; траектории с индексами **1'**, **2'**, **3'**, **4'** иллюстрируют возможность дефлектора анализировать частицы, эмитируемые с поверхности протяженного источника с линейными размерами d

наличие наряду с фокусировкой в плоскости аксиальной симметрии по полярному углу пространственной фокусировки второго порядка по азимутальным угловым направлениям, а именно при движении частиц по траекториям, исходящим из источника S_1 под углом φ к плоскости аксиальной симметрии.

Отмеченную особенность системы иллюстрируют изображения группы **4'—4** на рис. 4, а проекций траекторий движения частиц в азимутальных направлениях (под углом к плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка). Детальную картину движения в трехмерном пространстве представляют на рис. 4, б траектории однозарядных частиц с кинетической энергией 12.2 эВ. Группы траекторий с индексами **1'**, **2'**, **3'**, **4'** характеризуют способность системы анализировать частицы, эмитируемые с поверхности протяженного источника, линейные размеры которого задаются угловыми растворами пучков, пропускае-

мых системой в полярных и азимутальных направлениях. Если источник представляет собой протяженную плоскую поверхность, эмитирующую частицы изотропно по всем угловым направлениям (например, электроны ядерной конверсии при воздействии на образец гамма-излучения в условиях, близких полному внешнему отражению), применение системы может дать существенный выигрыш в чувствительности по сравнению с системами, обладающими фокусировкой только в плоскости аксиальной симметрии.

Система переносит изображение из кольца в кольцо без оптического увеличения, ее дисперсия по энергии имеет ту же величину, что и системы на основе центрально-симметричного 90° сферического дефлектора с фокусировкой вида ось—ось (практически равная дисперсии по энергии 180° сферического анализатора с радиусом главной траектории 45 мм).

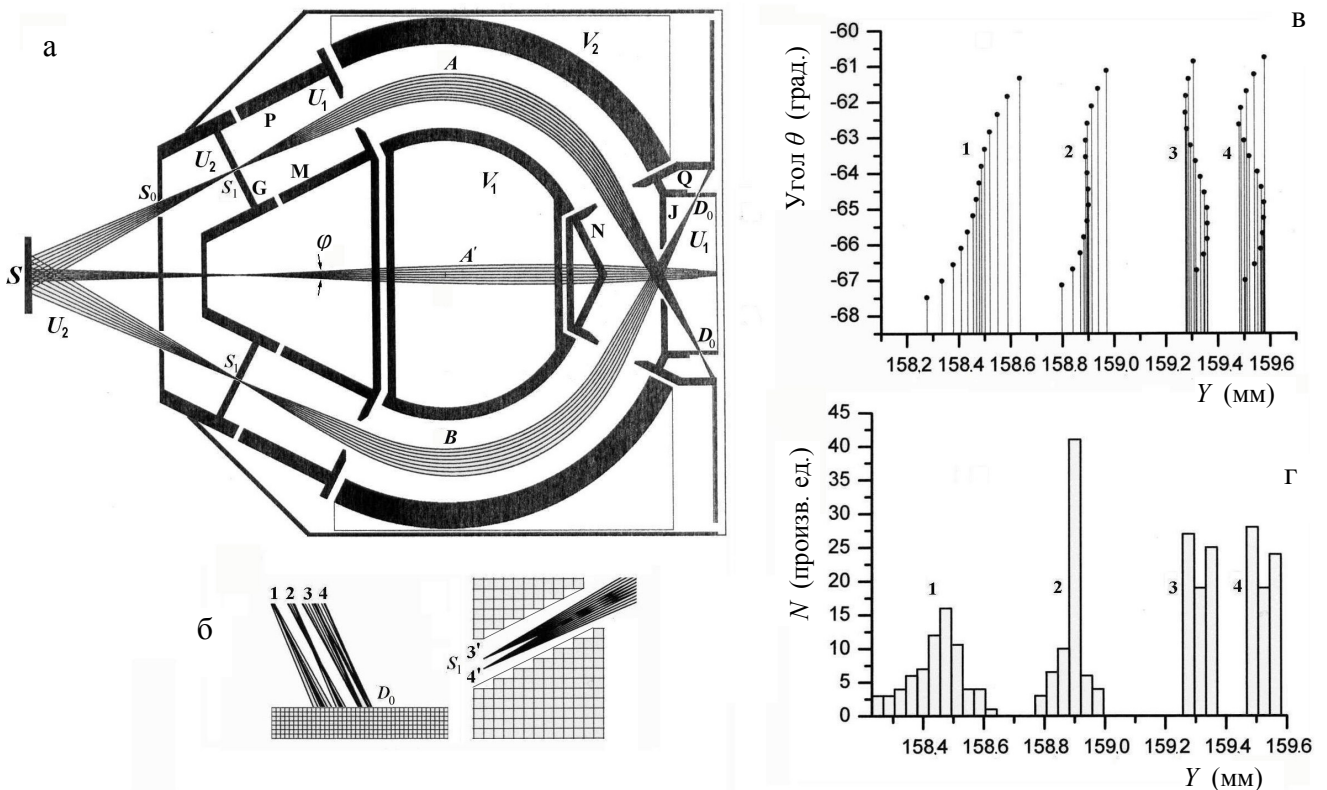


Рис. 5. Комбинация иммерсионной линзы и аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с фокусировкой вида кольцо—кольцо.

а — схема дефлектора с иммерсионной линзой на входе, образуемой в зазоре между корректирующими коническими электродами $P-M$ с потенциалом $U_1 = -3$ В и коническим электродом G с кольцеобразной диафрагмой S_1 при потенциале $U_2 = +30$ В; A — группа траекторий частиц, исходящих из кольцеобразного источника S_1 в коническом электроде G , с фокусами второго порядка в области кольцеобразной диафрагмы D_0 электрода J на выходе системы; главная ось пучка на входе в иммерсионную линзу составляет с осью аксиальной симметрии системы угол 27° ; угол раствора расходящегося пучка равен 8° ; угол раствора сходящегося пучка равен 7° ; кинетическая энергия однозарядных частиц при движении из кольцеобразного источника S_1 — $W_{2S} = 45.2$ эВ; кинетическая энергия однозарядных частиц при движении из кольцеобразного источника S_1 — $W_{2S} = 45.2$ эВ; энергия частиц в фокусе D_0 на выходе из системы равна 12.2 эВ; B — группа траекторий однозарядных частиц с кинетической энергией 12.2 эВ, исходящих из источника в позиции D_0 с фокусами второго порядка в позиции S_1 кольцеобразной апертурной диафрагмы в электроде G .

б — вид фрагментов пучков частиц группы траекторий A в области фокусов второго порядка D_0 ; фрагменты траекторий с индексами $1, 2, 3$ соответствуют частицам, движущимся из одной позиции $3'$ апертурной диафрагмы S_1 с энергиями, возрастающими в последовательности $45.1, 45.15, 45.2$ эВ; фрагмент 4 соответствует частицам с энергией 45.2 эВ, движущимся из позиции $4'$ в зазоре апертурной диафрагмы S_1 , и характеризует влияние на энергетическое разрешение геометрических размеров щелевого зазора апертурной диафрагмы S_1 и оптического увеличения системы; размер ячеек расчетной сетки электродов, показанной на рисунке, равен 0.1 мм.

в — графики функции прилета пучков $1, 2, 3, 4$ с фокусировкой второго порядка; графики $1, 2, 3$ соответствуют пучкам на рис. 1, б с начальными кинетическими энергиями, отличающимися на 0.05 эВ.

г — гистограммы сигналов, соответствующие функциям прилета пучков $1, 2, 3, 4$, показанным на (б); гистограммы характеризуют видоизменения формы сигналов от пучков разных энергий при дискретности координатно-чувствительного детектора 0.04 мм

Дополнение дефлектора иммерсионной линзой на входе, осуществляющей предварительное торможение частиц, образует энергоанализирующую систему, аналогичную по свойствам системе

с фокусировкой вида кольцо—ось, представленной на рис. 1, б. Общий вид системы на основе комбинации иммерсионной линзы и аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора

с пространственной фокусировкой второго порядка вида кольцо—кольцо показан на рис. 5, а. Иммерсионная линза, создаваемая разностью потенциалов в пространстве между корректирующими коническими электродами **Р—М** с потенциалом $U_1 = -3$ В и коническим электродом **Г** с потенциалом $U_2 = +30$ В, производит торможение однозарядных частиц, движущихся из кольцеобразного источника **S**₁ с начальной кинетической энергией $W_{2S} = 45.2$ эВ, до энергии 12.2 эВ, соответствующей энергии пропускания дефлектора. Предварительное торможение частиц на входе в дефлектор приводит к росту энергетической дисперсии системы в целом.

Дисперсию системы по энергии характеризуют приведенные на рис. 5, б фрагменты **1, 2, 3** траекторий частиц в позиции **D**₀ на выходе из системы, соответствующие в порядке возрастания начальной кинетической энергией частиц 45.1, 45.15, 45.2 эВ (с общей позицией старта **3'** в щелевом зазоре апертурной диафрагмы **S**₁), а также графики функций прилета этих частиц на рис. 5, в. Фрагмент **4** соответствует частицам с энергией 45.2 эВ,

стартующим из позиции **4'** в зазоре апертурной диафрагмы **S**₁. Величина смещения пучка в позиции **D**₀ относительно фрагмента **3** характеризует оптическое увеличение системы и позволяет оценить по виду функций прилета и гистограмм сигналов на рис. 5, г влияние на энергетическое разрешение геометрических размеров щелевого зазора апертурных диафрагм **S**₁ и **D**₀ на входе и выходе системы. Ограничиваясь в рассматриваемом конкретном примере системы размерами щелевых зазоров апертурных диафрагм в пределах 0.1 мм, можно получить разрешение по энергии порядка 0.1 %.

СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Дополнение выше рассмотренной системы в соответствии со схемой на рис. 6, а системой полых конических иммерсионных линз, устанавливаемой в промежутке **L** между источником и каскадом дефлектора, преобразует всю систему в светосильный спектрометр высокого энергетического

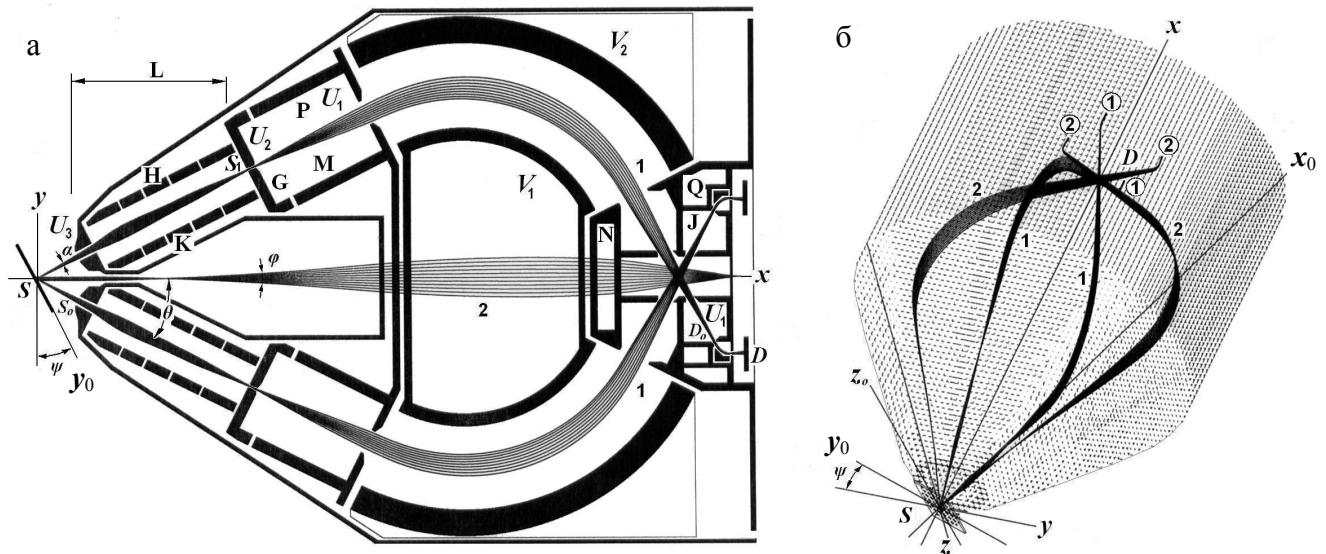


Рис. 6. Спектрометр заряженных частиц на основе аксиально-симметричного 90° сферического дефлектора с предварительным торможением частиц системой полых конических линз.

а — схема дефлектора с иммерсионной линзой на входе (электроды **Р—М** с потенциалом U_1 , **S**₁—**Г** с потенциалом U_2) и системой полых конических иммерсионных линз в промежутке **L** (сборка из электродов **Н—К** и электрода входной апертурной диафрагмы **S**₀ с потенциалом U_3) для предварительного торможения частиц; **1** — группа траекторий частиц, пропускаемых системой с фокусами второго порядка в позиции **D**₀ кольцеобразной диафрагмы в электроде **Ж** на выходе перед координатно-чувствительным детектором частиц **D**; главная ось пучка составляет с осью аксиальной симметрии системы угол $\theta = 27^\circ$, α — угол раствора пучка, пропускаемого системой, равен 5° ; группа **2** — проекции траекторий ленточного плоскопараллельного пучка однозарядных частиц, движущихся из источника **S** в азимутальном направлении в плоскостях, перпендикулярных плоскости рисунка; ψ — угол наклона плоскости, совпадающей с поверхностью источника частиц **S**, к плоскости yz спектрометра.

б — трехмерное изображение траекторий однозарядных частиц в спектрометре на пути от источника **S** до детектора частиц **D**; изображения траекторий с индексами **1, 2** характеризуют движение частиц в системе во взаимноперпендикулярных плоскостях

разрешения. Сравнительно недавно разработанная теория таких линз [8, 9] показывает, что их свойства близки к свойствам обычных аксиальносимметричных цилиндрических линз, но отличаются от последних тем, что позволяют транспортировать полые конические пучки частиц в широком диапазоне углов.

Линза представляет собой сборку из конических коаксиальных электродов **H—K** с различными потенциалами и электрода входной апертурной диафрагмы S_0 с потенциалом U_3 , равным потенциалу источника частиц S . Она обеспечивает предварительное торможение пучков частиц, следующих из источника S , и фокусировку этих пучков на вход кольцеобразной щелевой апертурной диафрагмы S_1 каскада дефлектора с потенциалом U_2 . В зависимости от величины разности потенциалов $U_3 - U_2$ в линзовой системе промежутка **L**, определяющей кратность изменения энергии частиц на входе в каскад дефлектора, разрешающая сила спектрометра по энергии при его фиксированной геометрии может варьироваться от нескольких сотен до десятков тысяч. Например, при настройке каскада дефлектора на энергию входящих в него частиц 45 эВ и 25-кратном торможении частиц, эмитируемых источником, полем линзы в промежутке **L** (начальная кинетическая энергия частиц на выходе из источника более 1000 эВ) разрешающая сила спектрометра по энергии может превышать 10 000. Разделение частиц по энергии происходит в дефлекторе, где энергия частиц минимальна и релятивистское смещение траекторий отсутствует, благодаря чему шкала энергий спектрометра абсолютно линейна и ее погрешность определяется только погрешностью управляющих электростатических потенциалов.

Геометрия фокусировки частиц в кольцо удобна для сопряжения спектрометра с координатночувствительным детектором посредством установки за кольцеобразной щелевой диафрагмой D_0 простой системы в виде коаксиального конического электрода с потенциалом, отклоняющим выделенный диафрагмой пучок на плоскость детектора **D**.

Таким образом, спектрометр позволяет анализировать одновременно пространственное энергетическое распределение эмитируемых частиц в широком диапазоне углов. Полную информацию об этом распределении можно получить, изменяя углы наклона источника частиц к оси аксиальной симметрии системы или меняя положение спектрометра по отношению к источнику, если он зафиксирован. Общий вид в трехмерном пространстве на рис. 6, б иллюстрирует эти возможности спектрометра. Изображения траекторий с индексами **1**, **2** характеризуют движение частиц в спектрометре во взаимноперпендикулярных плоскостях и положение фокусов в плоскости детектора **D**.

Внешнее расположение источника частиц в схеме спектрометра обеспечивает оптимальную геометрию совмещения с вспомогательными системами: манипулятором образца; электронной пушкой для исследований с помощью метода спектроскопии Оже-электронов; источниками рентгеновского, ультрафиолетового и лазерного излучений для спектроскопии фотоэлектронов; ионно-лучевыми системами для бомбардировки и травления поверхности; источниками вакуумного напыления и другими устройствами.

Компактность и небольшие размеры спектрометра (длина вместе с детектором около 250 мм, внешний диаметр с магнитными экранами не более 150 мм) упрощают проблемы экранировки от внешних магнитных полей, снижают вес и стоимость прибора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры сочетания иммерсионных линз с системами сферического дефлектора с фокусировкой второго порядка показывают высокую эффективность применения этих систем в спектроскопии заряженных частиц высокого энергетического разрешения. На основе разработанных решений возможно построение компактных светосильных спектрометров, обладающих разрешающей силой по энергии в диапазоне от нескольких сотен до десятков тысяч.

Автор выражает искреннюю признательность М.И. Явору за полезные замечания, дискуссии и предоставление возможности использования программ моделирования электронно-оптических систем [10]. Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 0120.040.9756 гос. регистрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Purcell E.M. The focusing of charged particles by a spherical condenser // Phys. Rev. 1938. V. 54, N 10. P. 818–826.
2. Заиквара В.В., Редькин В.С. К вопросу о фокусировке пучка заряженных частиц электростатическим зеркалом с цилиндрическим полем // ЖТФ. 1969. Т. XXXIX. С. 1452–1460.
3. Risley J.S. Design parameters for the cylindrical mirror energy analyzer // Rev. Sci. Instr. 1972. V. 43. P. 95–104.
4. Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А. и др. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1971. С. 288–305, 376–382.
5. Белов В.Д. Пространственная фокусировка второго порядка пучков заряженных частиц на краевых полях электростатического секторного сферического дефлектора с большим меж-

- электродным зазором // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 4. С. 64–73.
6. Крачино Т.В., Белов В.Д. Энергоанализатор Оже-электронов на основе цилиндрического зеркала с фокусировкой кольцо—ось // ЖТФ. 1983. Т. 53, № 10. С. 2059–2066.
 7. Крачино Т.В., Белов В.Д. Энергоанализ медленных вторичных электронов в цилиндрическом зеркале // ЖТФ. 1983. Т. 53, № 10. С. 2067–2069.
 8. Баранова Л.А., Явор М.И. и Явор С.Я. Коаксиальные линзы с продольным полем для фокусировки полых пучков // ЖТФ. 1990. Т. 60, № 7, 8. С. 50–55 (№ 7); 16–22 (№ 8).
 9. *Berdnikov A.S. and Yavor M.I.* Calculation of toroidal and conical electrostatic fields for angle resolved electron energy analysis // *J. Electron Spectr.* 1998. V. 94. P. 7–16.
 10. *Dahl D.A.* SIMION 7 User's Manual. Idaho National Engineering Lab., 2000. 657 p.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 5.05.2006.

IMMERSION LENS IN THE AXIALLY SYMMETRIC ELECTROSTATIC SYSTEMS BASED ON A SPHERICAL SECTOR DEFLECTOR WITH SPATIAL FOCUSING OF THE SECOND ORDER

V. D. Belov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

In this paper the results of computer simulation of energy analyzer systems are presented. The systems are based on a combination of hollow electrostatic lenses with various configurations of the axially symmetric sector spherical deflector with spatial focusing of the second order, such combination forming systems of axis to axis, axis to ring, ring to axis, ring to ring focusing. It is shown that the combination of hollow immersion lenses with systems based on the second order focusing spherical deflector provides high efficiency of these systems in high-resolution spectroscopy of charged particles. The particle separation in energy occurs in the deflector where particles energy is minimal and a relativistic shift of their trajectories is absent. Due to this fact the energy scale of a spectrometer is absolutely linear and the energy error is determined only by an error of input electrostatic potentials. Based on investigated systems, the compact design of high-luminosity spectrometers is possible with energy resolving power in a range from several hundreds up to tens of thousands.