

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 537.29:537.533.32/33

© В. Д. Белов, А. В. Хрущёв, И. Р. Николаев

ФОКУСИРОВКА ВЫСОКОГО ПОРЯДКА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ПО ЭНЕРГИИ

В статье рассмотрены режимы работы энергоанализатора типа цилиндрического зеркала, обеспечивающие получение острой угловой пространственной фокусировки более высокого порядка, чем второй. Найдены модификации цилиндрического зеркала, позволяющие построить энергоанализаторы с разрешающей способностью $E/\Delta E$ свыше 10^4 .

ВВЕДЕНИЕ

Со времени обнаружения В.В. Зашкварой [1] свойств фокусировки 2-го порядка по меридиональному (полярному) углу в поле электростатического цилиндрического конденсатора энергоанализирующая система на его основе (цилиндрическое зеркало) стала одной из наиболее распространенных в электронной спектроскопии, благодаря сочетанию достаточно высокой энергетической дисперсии и светосилы (напрямую связанной с угловым раствором анализируемого пучка, обеспечиваемым качеством фокусировки). Среди многообразия возможных вариантов электронно-оптических схем с фокусировкой второго порядка (три частных решения показаны на рис. 1, а) инструментальное воплощение получили системы с точками фокусов на оси аксиальной симметрии (фокусировка ось-ось, семейство траекторий 1 на рис. 1, а) и системы с фокусировкой ось-кольцо (семейство траекторий 3 на рис. 1, а), в которых стартующий из точечного источника на оси пучок заряженных частиц по пролёте ими области тормозящего поля имеет фокус для частиц одного заряда и энергии на поверхности внутреннего цилиндрического электрода зеркала. Предпринимались многократные попытки повысить разрешение анализаторов этого типа. Одно из удачных решений для рентгенофотоэлектронной спектроскопии высокого разрешения предложил Палмберг [2], создавший, так называемый, double path анализатор. В многокаскадной системе с фокусировкой ось-ось, кроме простого увеличения числа зеркал до двух, приводящего к росту вдвое дисперсии, для достижения наивысшего энергетического разрешения Палмберг применил также предторможение анализируемых электронов в поле сферического сеточного конденсатора, установленного перед входом в цилиндрический анализатор, в результате чего эффективная дисперсия возросла в число раз, кратное коэффициенту торможения.

Рассматривались также возможности повышения разрешения путём улучшения качества фокусировки, что достигалось путём каскадирования цилиндрического зеркала с зеркалом гиперболического типа [3] или путём изменения цилиндрического поля [4, 5]. В настоящей работе мы исследовали с помощью компьютерного моделирования возможность получения фокусировки более высокого порядка, чем второй, в классическом цилиндрическом зеркале путём помещения источника/приёмника частиц в область поля, что потенциально создавало дополнительные условия для компенсации абберрационных коэффициентов следующих порядков.

КОНФИГУРАЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ФОКУСИРОВКУ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА В ОДНОКАСКАДНОМ ЗЕРКАЛЕ

Для описания моделируемых конфигураций в цилиндрическом зеркале введём следующие параметры, отмеченные на рис. 1, а и 1, б: r_1 — радиус внутреннего цилиндрического электрода; r_2 — радиус внешнего цилиндрического электрода; r_s — удаление места расположения точечного источника электронов от оси аксиальной симметрии системы в меридиональной плоскости сечения (расстояние считается положительным при отсчёте от оси в направлении к точке фокуса в тормозящем поле между внутренним и внешним электродами цилиндрического зеркала и отрицательным в противоположном направлении); r_e — расстояние по радиусу от оси точки финиша (фокуса) электронов одинаковой энергии в тормозящем поле; L_e — длина проекции на ось аксиальной симметрии траекторий электронов от точки старта до точки финиша; на внутреннем цилиндрическом электроде и в пространстве до оси потенциал принят нулевым; U_1 — потенциал на внешнем цилиндрическом электроде; U_e — потенциал в точке финиша в тормозящем поле; E_0 — энергия стартующих из ис-

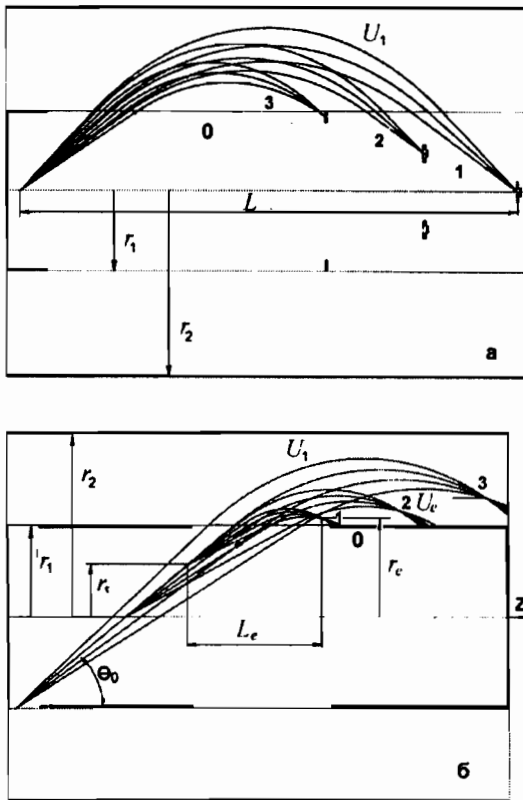


Рис. 1. Схема электродной конфигурации цилиндрического зеркала с семействами траекторий, соответствующим различным типам фокусировки. $r_2 = 2 r_1$, $r_1 = 23$ мм, $U_1 = -678,4$ В.

а — семейства траекторий с фокусировкой второго порядка в пространстве дрейфа; 1 соответствует фокусировке ось-ось при начальной энергии электронов $E_0 = 1300$ эВ, 2 и 3 — фокусировке ось-кольцо при $E_0 = 1150$ эВ и $E_0 = 960$ эВ, соответственно;

б — семейства траекторий с острой фокусировкой в полевом пространстве; 1 соответствует фокусировке пучка с начальной энергией электронов $E_0 = 457$ эВ при старте с $r_s = 0,57r_1$, 2 — старт с оси при $E_0 = 801$ эВ и 3 — старт с внутренней поверхности внутреннего цилиндра $r_s = -r_1$ при $E_0 = 1149$ эВ

точника электронов, E_e — энергия электронов в точке финиша. В конкретной модели $r_1 = 23$ мм, $r_2 = 46$ мм, $U_1 = -678,4$ В. Источник частиц размещён в бесполеовом пространстве, что соответствует значениям $r_s < 23$ мм.

Обнаружилось, что для каждого фиксированного положения r_s источника существует такое единственное значение E_0 начальной энергии электронов, при котором пучок образует острый фокус в области тормозящего поля с качеством фокусировки существенно выше, чем в конфигурациях,

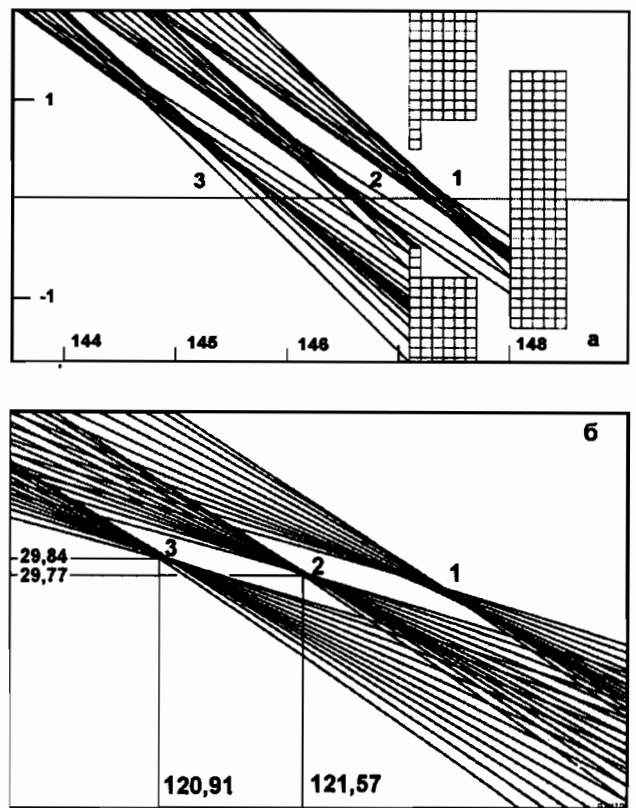


Рис. 2. Фрагменты сфокусированных монохроматических пучков в области кроссовера. Энергия электронов в пучках 2 и 3 меньше энергии в пучке 1 на 0,5 % и 1,0 %, соответственно; координаты по осям приведены в миллиметрах (горизонтальная — ось Z, вертикальная — r_e):

а — случай фокусировки второго порядка типа ось-ось в дрейфовом пространстве (соответствует семейству 1 на рис. 1, а);
б — случай острой фокусировки в области поля (соответствует семейству 3 на рис. 1, б)

формирующих фокусы второго порядка в бесполеовом пространстве. На рис. 1, б для примера показаны три семейства траекторий для различных точек старта и энергий электронов. Семейство 1 соответствует значениям r_s в интервале от 0 до r_1 , семейство 2 — $r_s = 0$, семейство 3 соответствует точкам старта с поверхности внутреннего цилиндра ($r_s = -r_1$). Для качественного сравнения характера фокусировки на рис. 2, а и 2, б приведены фрагменты пучков в области кроссовера в классическом случае фокусировки второго порядка ось-ось в дрейфовом пространстве (семейство 1 на рис. 1, а) и в случае острой фокусировки в области поля (семейство 3 на рис. 1, б). Пучки 1, 2 и 3 на рис. 2, а и 2, б соответствуют различным начальным энергиям E_0 , отличающимся одна от другой

на 0,5 % E_0 при одинаковом угловом растворе пучков, выходящих из источника, составляющем 12° . Видно, что, несмотря на невысокую дисперсию, свойственную фокусировке в тормозящем поле, разделение пучков, благодаря высокому качеству фокусировки, существенно выше, чем в случае фокусировки ось-ось. В конкретном случае, показанном на рис. 2, б, предельное энергетическое разрешение оценивается величиной менее 0,05 %. Аналогичный показатель для фокусировки ось-ось при сопоставимой энергии почти на поряд-

ок хуже (0,3 %).

Для каждого положения источника r_s существует единственное значение начальной энергии электронов E_0 , при котором в полевой области возникает единственный острый фокус, характеризуемый своим положением r_e и L_e . Так как фокусировка происходит в тормозящем поле, энергия электронов в области фокуса меньше начальной на величину ΔE_0 , определяемую потенциалом поля U_e в нём. Таким образом, всё многообразие возможных конфигураций может быть однозначно описано

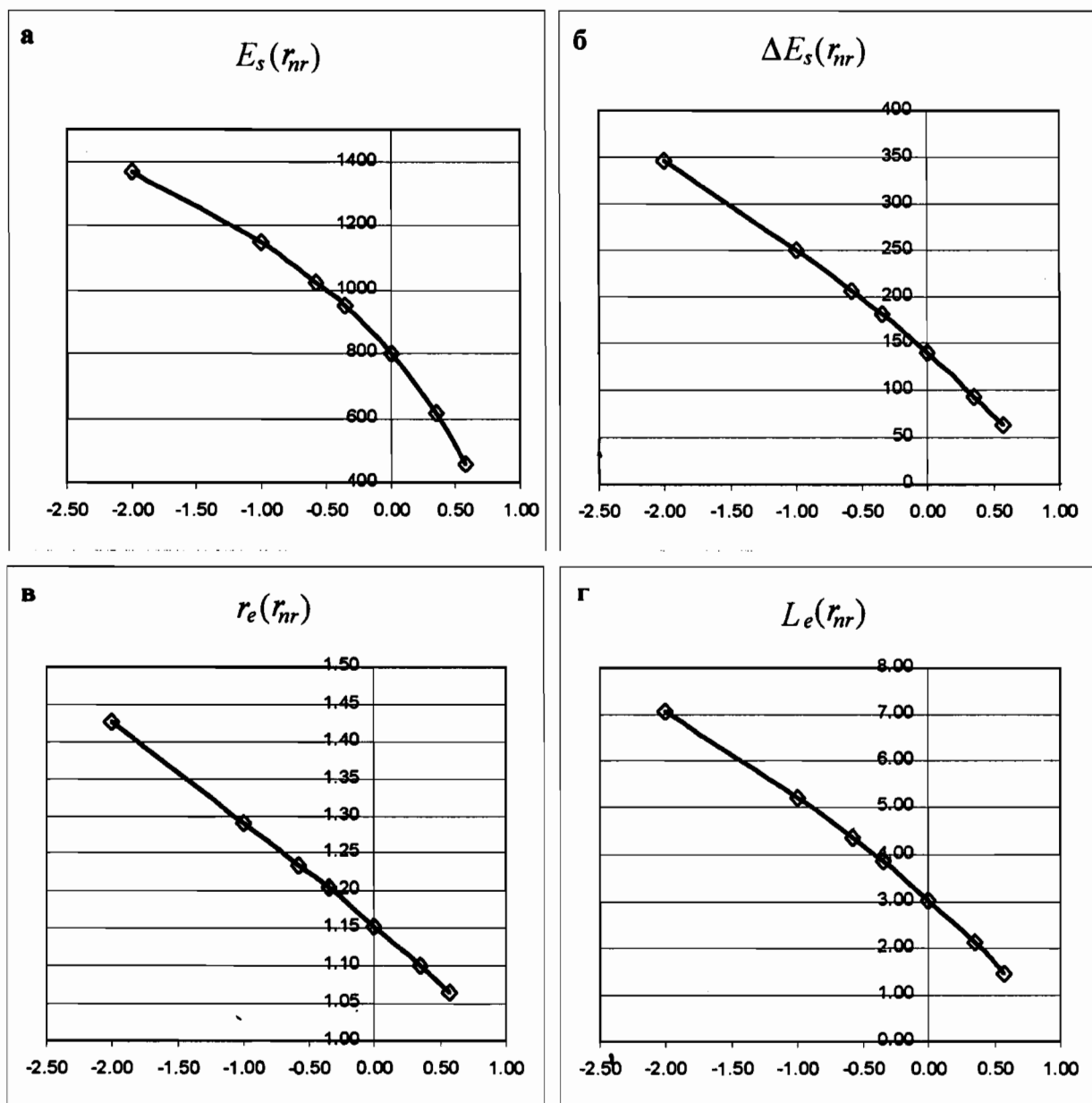


Рис. 3. Графики зависимостей конфигурационных параметров систем, реализующих острую фокусировку в области поля от нормированной координаты $r_{nr} = r_s/r_1$ точечного источника электронов: а — начальной энергии E_0 ; б — потери начальной энергии в тормозящем поле $\Delta E_0 = -e \cdot U_e$; в — нормированной на r_1 осевой координаты L_e точки фокуса; г — нормированной на r_1 радиальной координаты r_e точки фокуса

Таблица 1
Значения параметров, соответствующие условиям возникновения острой фокусировки

r_s/r_1	E_0	ΔE_0	r_e/r_1	L_e/r_1	θ_0
0,57	457	62,7	1,07	1,47	36,0°
0,35	615	93,7	1,10	2,12	37,0°
0,00	801	140,5	1,15	3,01	39,0°
-0,35	950	181,0	1,20	3,85	40,0°
-0,57	1020	207,0	1,23	4,35	42,5°
-1,00	1149	250,0	1,29	5,20	43,0°
-2,00	1371	347,0	1,43	7,07	44,0°

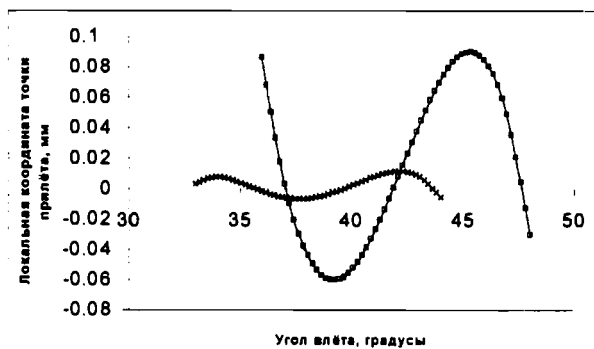


Рис. 4. Графики функции прилёта в окрестности точки фокуса второго порядка при фокусировке ось-ось и для случая острой фокусировки в области поля. × — функция прилёта в области фокусировки высокого порядка, — функция прилёта в области фокусировки второго порядка

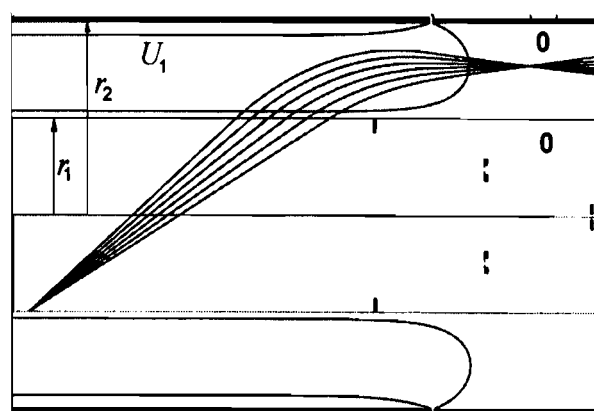


Рис. 5. Модифицированная конфигурация цилиндрического зеркала с торцевой поллой линзой, изменяющая направление выходного пучка на параллельные оси при сохранении острой фокусировки

совокупностью значений параметров r_e , L_e и ΔE_0 при данных r_s и E_0 . График на рис. 3, а, характеризует зависимость начальной энергии электронов E_0 , при которой возникает острая фокусировка в полевом пространстве, от положения источника r_s . Соответствующие зависимости параметров r_e , L_e и ΔE_0 от r_s показаны на рис. 3, б, в, г. Все зависимости носят монотонный характер и, за исключением графика $E_0(r_s)$, являются почти линейными.

Конкретные значения параметров, соответствующих условиям возникновения острой фокусировки для значений r_s/r_1 в практически интересном интервале, сведены в таблицу 1. В неё также включены значения углов наклона θ_0 центральной траектории пучка к оси системы.

Вследствие торможения угол раствора пучка в кроссовере больше углового раствора входного пучка, соответствующий коэффициент углового увеличения в зависимости от конфигурации меняется в пределах 1,5–1,7. Вид каустика, возникающих в области кроссовера остро сфокусированного пучка (рис. 2, б), резко отличается от картины, типичной для фокусировки второго порядка. Особенности структуры пучка в этой области характеризуются функцией прилёта $s(\theta_0)$. Она отражает зависимость локальной координаты s точки пересечения траектории с экраном, расположенным в области перетяжки поперёк пучка, от начального угла θ_0 . На рис. 4 приведена функция прилёта для центральных пучков, показанных на рис. 2, а и 2, б. В окрестности точки фокуса второго порядка функция прилёта локально диффеоморфна функции $y=ax+x^3$ (параметр $a=0$ при перемещении экрана точно в фокус), в то время как для пучка 2 на рис. 2, б функция прилёта с точностью до диффеоморфизма имеет вид $y=ax^2+x^4$, что свидетельствует о близости фокусировки третьего порядка. Величина провала в середине показывает, что абберрационные коэффициенты до второго порядка имеют ненулевые, но минимальные значения. Близость фокуса более высокого порядка приводит к тому, что размер кроссовера пучка существенно меньше по сравнению с кроссовером пучка в условиях фокусировки второго порядка при одинаковом начальном угловом растворе.

Наличие описанного типа фокусировки в области поля является устойчивым свойством, что допускает различные модификации конфигурации системы, в частности, доступно изменение направления выходного пучка путём закорачивания поля цилиндрического конденсатора заземлённой поллой линзой. Пример такой модификации для семейства траекторий 3 на рис. 1, б приведён на рис. 5. В результате действия ускоряющего поля торцевой линзы выходной пучок направлен параллельно оси системы.

МНОГОКАСКАДНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ МОДУЛЕЙ С ФОКУСИРОВКОЙ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Используя электронно-оптические элементы, аналогичные приведенному на рис. 5, можно построить составную многокаскадную систему, позволяющую существенно повысить разрешающую способность по энергии по сравнению с одиночным каскадом или анализатором типа цилиндрическое зеркало в традиционном исполнении. Пример такой системы приведен на рис. 6. Энергоанализатор имеет два модуля — сбора электронов и их анализа, как показано на рис. 6. Модуль сбора, в свою очередь, состоит из двух каскадов. Первый из них представляет собой осесимметричное электростатическое цилиндрическое зеркало с высоким качеством фокусировки пучка, собирающее электроны в полной области азимутальных углов (360°) и достаточно широкой области полярных углов (от 39° до 27°). Это зеркало формирует пучок электронов с выходным участком главной траектории, параллельным образующим некоторой цилиндрической поверхности. Вторым каскадом модуля сбора является полая осесимметричная иммерсионная линза [6, 7], которая создает кольцеобразное изображение исследуемой области на входе в основной энергоанализатор. Дисперсия по энергии собирающего зеркала приводит к предварительной фильтрации пучка электронов на входной щели модуля анализа, так что только 1–2 % полного энергетического спектра проходит через эту щель. Таким образом уменьшаются эффекты образования вторичных электронов, выбиваемых пучком со стенок выходного каскада энергоанализатора, и, следовательно, увеличивается отношение сигнал/шум прибора.

Модуль анализа (основной анализатор) может быть конструктивно решен так же, как и первое электростатическое зеркало, но обращенное по направлению движения заряженных частиц (как показано на рис. 6), или с использованием вместо него анализатора другого типа, например полусферического дефлектора.

Основной анализатор преобразует кольцеобразное изображение, формируемое на его входе, в набор коаксиальных кольцеобразных изображений на выходе, где каждое кольцо соответствует определенной линии энергетического спектра. Детектирование этого спектра может проводиться в режиме его развертки через выходную круглую диафрагму при совмещении фокуса с осью аксиальной симметрии Z или коаксиальную узкую выходную кольцеобразную щель, если фокус последнего модуля расположен вне оси.

Для оценки параметров предложенного энергоанализатора мы численно рассчитали с помо-

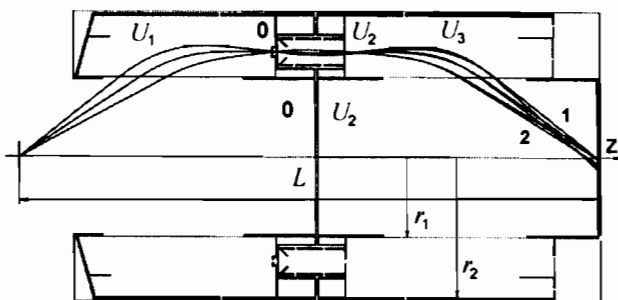


Рис. 6. Схема многокаскадной системы, образованной двумя цилиндрическими зеркалами с каскадом промежуточного торможения на основе пятиэлектродной полой линзы. Начальная энергия электронов в семействе траекторий 1 $E_0 = 845$ эВ, в семействе 2 она меньше на 0,5 эВ

щью программы SIMION 3D [8] траектории электронов в показанной на рис. 6 конфигурации. Были выбраны следующие геометрические размеры анализатора: расстояние вдоль оси симметрии между поверхностью образца и входом в иммерсионную линзу 75 мм, радиус внутреннего цилиндрического электрода собирающего конического зеркала 23 мм, радиус внешнего цилиндрического электрода 40 мм, длина иммерсионной линзы 25 мм, радиус кольцевой входной щели основного анализатора 30 мм и расстояние вдоль оси симметрии системы между этой щелью и выходной щелью прибора 70 мм. При диапазоне анализируемых кинетических энергий электронного пучка вблизи $E_0 = 845$ эВ потенциалы на электродах, показанных на рис. 1, таковы: $U_1 = -554$ В, $U_2 = -830$ В, $U_3 = -840$ В. Таким образом, коэффициент замедления пучка $E_0/E_c = 56$, где $E_c = 15$ эВ — средняя конечная кинетическая энергия электронов. В этом случае ширина кольцевого изображения на выходной щели анализатора равна $\sim 0,3$ мм при ширине воспринимаемого прибором диапазона полярных углов 12° , и энергетическое разрешение анализатора по основанию пика равно $\Delta E/E = 2,3 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, разрешающая способность этой системы более чем на порядок величины выше, чем в традиционной системе с фокусировкой ось-ось при одинаковой светосиле и пропускании. Вставка полой линзы позволяет исключить применение дополнительных сеточных границ раздела полей, в итоге в составной двухмодульной системе их остаётся две, также как и в традиционной схеме. Так как при переходе к новой конфигурации габаритные размеры увеличиваются только по длине (приведённая длина L за счёт вставки полой линзы составляет около $7,5 r_1$ вместо $6,13 r_1$ для традиционной схемы с фокусировкой ось-ось, показанной на рис. 1, а),

она может быть достаточно эффективно применена для модернизации существующего парка приборов с использованием деталей прежней конструкции энергоанализатора.

В случае, если цилиндрическое зеркало в модуле анализа заменяется на полусферический дефлектор, а коэффициент замедления увеличивается до 75 ($E_c = 11,3$ эВ), разрешение по энергии улучшается до уровня $\Delta E/E = 0,7 \cdot 10^{-4}$. Приведенные значения разрешения соответствуют значениям, типичным для современных высокоточных электронных спектрометров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе показана возможность получения в системе, основанной на классическом цилиндрическом зеркале, режимов и конфигураций, обеспечивающих фокусировки более высокого порядка, чем второй. Это позволяет при меньшей, чем в канонической схеме с фокусировкой «ось-ось» дисперсии, получить на порядок более высокое энергетическое разрешение. Найденные конфигурации в сочетании с полый линзой порождают новые оптические элементы, обладающие высоким качеством фокусировки и допускающие построение многокаскадных систем (с промежуточным торможением), обеспечивающих сверхвысокое энергетическое разрешение при показателях пропускания (светосилы) цилиндрического анализатора. Авторы выражают искреннюю признательность М.И. Явору за полезные замечания, дискуссии и предоставление возможности использования программ моделирования электронно-оптических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заишквара В.В., Корсунский М.И., Космачёв О.С.* Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ. 1966. Т. 36, № 1. С. 132–138.
2. *Palmberg P.W.* // J. Electron. Spec. 1974. № 5. P. 691–698;
Анализ поверхности методами Оже-и рентгеновской спектроскопии // Ред. Д. Бриггс и М.П. Сих. М.: Мир, 1987. С. 99–101.
3. *Заишквара В.В.* Компенсация угловой кубической абберации в системе двух электростатических зеркал // ЖТФ. 1974. Т. 44, № 6. С. 1334–1341.
4. *Заишквара В.В., Тарасов В.Ф.* Корректор угловых аббераций в анализаторе типа цилиндрического зеркала // ЖТФ. 1976. Т. 46, № 9. С. 1755–1761.
5. *Меньшиков К.А.* Электростатический анализатор заряженных частиц с тремя коаксиальными цилиндрическими электродами // ЖТФ. 1982. Т. 52, № 11. С. 2245–2252.
6. *Баранова Л.А., Явор М.И., Явор С.Я.* Коаксиальные линзы с продольным полем для фокусировки полых пучков // ЖТФ. 1990. Т. 60, № 7. С. 50–55; № 8. С. 16–22.
7. *Belov V.D., Yavor M.I.* Two-stage systems with intermediate beam retarding for energy and spatial analysis of photoelectrons // Nucl. Instrum. Meth. A. 1999. V. 427. P. 197–202.
8. *Dahl D.A.* SIMION 3D User's Manual. Idaho: Idaho National Engineering Lab, 1995. 291 p.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 18.10.99.

ON THE HIGH-ORDER FOCUSING IN THE ELECTROSTATIC CYLINDRICAL MIRROR FIELD AND POSSIBILITIES OF ITS APPLICATION TO INCREASE AN ENERGY RESOLUTION

V. D. Belov, A. V. Kroutchev, I. R. Nikolaev

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

Modes of operation of the cylindrical mirror energy analyzer providing high-order angular focusing are considered. Modifications of cylindrical mirror allowing constructing energy analyzers of the resolution power $E/\Delta E$ better than 10^4 are described.