

УДК 517.956.225: 621.319.7

© С. И. Шевченко

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА ТИПА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО. Ч. III

Исследованы два режима работы энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало: режим минимальной ширины пучка и режим, при котором оптимальная апертура является максимальной. Показано, что последний режим является одной из реализаций режима минимальной ширины пучка. При правильном выборе зазора выходной диафрагмы аппаратная функция в режиме минимальной ширины пучка имеет один пик.

Кл. сл.: аксиальный энергоанализатор, цилиндрическое зеркало, аппаратная функция (АФ), минимальная ширина пучка (МШП), разрешающая способность, пропускание

ВВЕДЕНИЕ

Представленная работа является продолжением работ [1, 2], в которых методом, развитым в [3], рассмотрены режимы работы цилиндрического энергоанализатора (ЦЭА, или цилиндрического зеркала ЦЗ).

Ранее в ряде работ, посвященных изучению работы ЦЗ, отмечалось наличие минимальной ширины пучка (МШП) (см., например, [4–11]). Повидимому, впервые в работе [4] было обращено внимание, что по аналогии с оптикой в оптике заряженных частиц плоскость, в которой сечение пучка частиц минимально, лежит ранее точки фокусировки второго порядка (Ф2П) (для ненулевого зазора апертуры). На основании этого делается предположение, что если в месте нахождения МШП разместить выходную диафрагму (ВД), то можно получить лучшее разрешение (разрешающую способность), чем при режиме Ф2П. Однако в [8, 9] численным методом получена аппаратная функция ЦЗ, работающего в режиме МШП, имеющая вид двух хорошо разделенных пиков.

Легко показать, что если, оставаясь в рамках режима МШП, устремить апертурный зазор к нулю (симметрично относительно центральной для Ф2П траектории), то ЦЗ перейдет в режим Ф2П.

Из рассмотрения пропускания анализатора в пространстве энергия—угол (см. [1, 3, 12–14]) видно, что при фиксированном зазоре ВД, и варьируя один из параметров (удаление ВД от источника электронов, удаление ВД от оси или энергия фокусировки), а остальные зафиксировав или находя в процессе расчета, можно найти такой режим работы ЦЗ (такое значение этого параметра), для которого зазор апертуры, проходя через который электроны попадают в детектор, максимален

[1, 3, 14]. Поэтому этот режим ниже будем называть режимом максимальной апертуры (МА). Этому режиму соответствует практически полное отсутствие хвостов пика аппаратной функции АФ [1].

Если при построении, в результате которого получаются параметры режима МА, перейти к предельному случаю малой (бесконечно малой) ширины ВД, оставаясь при этом в рамках режима МА, то, вполне очевидно, режим МА перейдет в режим Ф2П. Этот предел мы еще рассмотрим ниже.

То есть режимы МА и МШП имеют в качестве предельного случая режим Ф2П. Но если любой режим МА переходит в Ф2П, то для режима МШП требуется дополнительное условие симметричности апертурного зазора относительно центральной для Ф2П траектории.

В работе [1] было сделано предположение, что режим, который выше был назван режимом максимальной апертуры, реализуется при работе режима МШП. В данной работе попробуем подтвердить или опровергнуть данное предположение.

С одной стороны, условие МШП относится к самому пучку и никак не связано с положением и величиной ВД, а положение и величина ВД выбираются, исходя из положения и величины МШП. С другой стороны, условие МА (см. [1]) тесно связано с положением и шириной ВД.

В представленной работе рассмотрим и сравним режимы МШП и МА.

Напомним, что исследования ранее [1–3] и в представленной работе проведены на идеальном ЦЗ со следующими параметрами: радиус внутреннего цилиндра ЦЗ равен 20 мм, радиус внешнего цилиндра ЦЗ равен 50 мм, с боков осуществлено замыкание контура кольцами, на которых выстав-

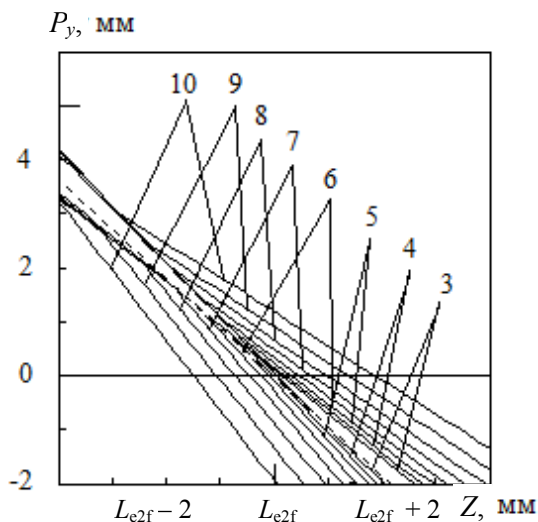


Рис. 1. Вид границ пучка электронов после прохождения дисперсного пространства при разных значениях апертуры в переменных (Z, P_y) .

Пунктирной линией нарисована центральная траектория пучка, для которого в режиме Ф2П фокусировка осуществляется на ось ЦЗ. Пояснения в тексте

лено распределение потенциала, соответствующее идеальному цилиндрическому полю, электроны входят в дисперсное пространство и выходят из него через сетки, которые считаются идеальными, т. е. не вносящими никаких искажений в пучок электронов, пучок электронов стартует с оси ЦЗ и движется слева направо.

РЕЖИМ МИНИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ПУЧКА

Обычно под шириной пучка подразумевается его ширина, измеряемая в его сечении плоскостью, перпендикулярной пучку (его центральной

траектории). В электронной спектроскопии более интересна ширина пучка в сечении плоскостью (линией) ВД. Наиболее часто такая линия расположена параллельно оси прибора. Именно эту ширину пучка мы будем рассматривать в данной работе, подобно [4, 6], а не как в работе [7], в которой рассмотрена классическая версия МШП.

О виде пучка электронов вблизи МШП можно судить по представленной в [8] зависимости ширины пучка от энергии при разных величинах полуапертуры. Более правильно, на наш взгляд, исследовать вид пучка электронов, изучая границы пучка.

На рис. 1. представлены графики границ (огibaющих) пучка электронов для нескольких значений зазора апертуры, симметричной относительно траектории, являющейся центральной, когда в режиме Ф2П фокусировка второго порядка осуществляется на ось ЦЗ. Показаны границы (огibaющие) пучка электронов $Z_L, Z_R(P_y)$, где P_y — радиус, Z_L и Z_R — левая (слева) и правая (справа) z -координаты границ пучка электронов, отсчитываемые от точки старта; L_{e2f} — расстояние от источника электронов до фокуса второго порядка, когда фокусировка второго порядка осуществляется на ось. Цифры при каждой кривой указывают на соответствующую полуапертуру пучка в градусах.

Для нахождения МШП применим следующий алгоритм определения местоположения и ширины пучка: фиксируем энергию пучка (энергию центральной траектории) и потенциал на верхнем электроде (цилиндре). Для заданного пучка (совокупность траекторий) для всех значений удаления ВД от оси (перебираем значения P_y) и для разных углов старта θ вычисляем z -координату точки $r = P_y = \text{const}$. Среди этих значений z находим минимальное (L) и максимальное (R) значение

Табл. 1. Значения по 4 исследованиям величины МШП (столбцы 2–5) и расстояния от оси до МШП (столбцы 6–9) для разных величин полуапертуры (столбец 1, в градусах). Подробности в тексте

Полуапертура, град	Величина МШП				Расстояние от оси до МШП				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2		0.35	0.33	—	0.336	0.66	0.64	—	0.651
4		2.93	2.64	—	2.733	2.66	2.57	—	2.625
6		10.37	8.91	8.8	9.375	6.05	5.79	8.3	5.947
8		25.66	21.12	23.0	22.566	10.84	10.29	11.0	10.626
10		52.12	41.25	45.0	44.714	17.03	16.08	17.0	16.652
12		93.38	71.29	81.0	78.300	24.59	21.16	24.0	23.992

пересечения траекторий с линией (Z_L, Z_R) и ширину пучка в данном сечении $d_y = Z_L - Z_R$. Из всех значений d_y выбираем наименьшее. Это значение d_y является МШП в первом приближении. Далее проводим уточнение найденных величин (P_y, Z_L, Z_R, d_y) . Для этого промежуток значений радиуса ВД, содержащий найденное значение P_y в качестве центрального, делим на некоторое число отрезков (например, на 20) и для каждого нового радиуса $r = P_y^{\text{new}}$ находим новое значение наименьшей ширины пучка d_y и новые значения величин (Z_L, Z_R) . Этот процесс продолжается до достижения требуемой точности (обычно хватает относительной точности 10^{-6}).

Для удаления МШП от оси (P_y) и МШП (d_y) в [6] были получены аналитические выражения, в [4] — P_y и d_y были получены графически, а в [15] результаты этих работ собраны в таблице. Мы приводим эту таблицу (табл. 1), пересчитав все результаты, кроме результатов работы [4], и добавив в нее наши результаты.

В табл. 1 представлены МШП в виде $d_y \times 10^3 / r_1$ и расстояние от оси до МШП в виде $P_y \times 10^2 / r_1$ для разных величин полуапертуры. В столбце 1 приведена величина полуапертуры в градусах; в столбцах 2, 6 — результаты применения формул работы [6]; в столбцах 3, 7 — ре-

зультаты полученных в [15] предельных случаев формул работы [6] для малых величин полуапертуры; в столбцах 4, 8 — данные, полученные в [4]; и в столбцах 5, 9 — данные, полученные в представленной работе. Видно, что наши результаты неплохо совпадают с результатами, полученными в работах [4, 6, 15].

Исторически сложилось, что исследование МШП проводилось не для любого пучка электронов, а именно для того, для которого был получен режим Ф2П [6–9]. В представленной работе было проведено исследование границ (огibaющих) пучков электронов с фиксированным апертурным зазором при смещении их центральной траектории вправо и влево относительно центральной траектории режима Ф2П. Границы пучка электронов удобно рассматривать при их отображении в переменных $(Z - L_{e2f}, P_y)$ (см. рис. 2). Вид огibaющих, соответствующих рис. 1, показан на рис. 2, в. На рис. 2 показаны графики огibaющих (левой и правой) пучка электронов, построенные относительно центральной траектории режима Ф2П, для которого фокусировка осуществляется на ось ЦЗ, при различных значениях полуапертуры и отклонения угла старта центральной траектории. Отклонение угла старта центральной траектории пучка от центральной траектории режима Ф2П для случая (а) равно -2° , (б) — -1° , (в) — 0° , (г) — 1° , (д) — 2° . Представленная на рис. 2 величина полуапертуры изменяется от 3° до 10° с шагом 1° . В действительности вычисления проводились,

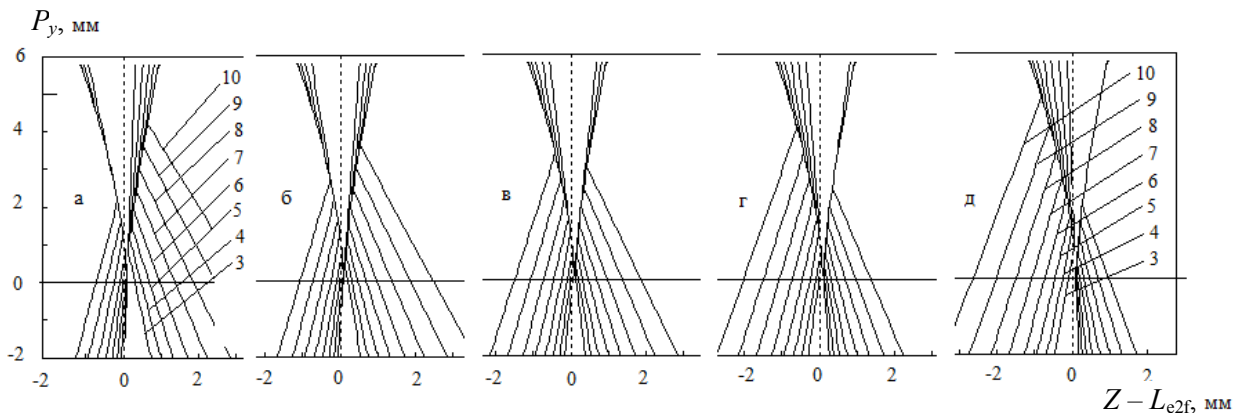


Рис. 2. Вид границ пучка электронов в переменных $(Z - L_{e2f}, P_y)$ вблизи оси ЦЗ после прохождения дисперсного пространства для разных величин отклонения центральной траектории пучка от центральной траектории режима Ф2П, для которого фокусировка осуществляется на ось ЦЗ, и при разных значениях полуапертуры. Пояснения в тексте

кроме вышеуказанных величин полуапертуры, и для величин, равных 0.01, 1, 2°. Однако графики для этих величин полуапертуры не были нами представлены, чтобы не загромождать среднюю часть рисунков. Цифры при огибающих равны величине полуапертуры в градусах. Сплошными линиями нарисованы левая (слева) и правая (справа) границы пучка, если смотреть на пучок со стороны детектора (если смотреть вдоль центральной траектории, — то наоборот), пунктирной линией — центральная траектория пучка, для которого в режиме Ф2П фокусировка осуществляется на ось ЦЗ, сплошная горизонтальная линия — ось ЦЗ.

Для пучка, центральная траектория которого совпадает с центральной траекторией Ф2П, левая и правая огибающие расположены почти симметрично относительно центральной траектории. При увеличении апертуры пучка МШП, как это получено в [6, 8], удаляется от оси. При малом отклонении центральной траектории от центральной траектории Ф2П (рис. 2, б и г) уже заметно, что картина огибающих становится несимметричной, МШП становится менее выраженной и ее величина увеличивается. При больших отклонениях центральной траектории от центральной траектории Ф2П, МШП может вообще не появляться, особенно при больших апертурах.

Из данных, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что режим МШП существует не только для пучка, для которого реализуется режим Ф2П. При некотором отклонении апертуры (центральной траектории) от апертуры режима Ф2П

для пучка все еще существует МШП. И только для довольно значительных отклонений (особенно для больших апертурных зазоров) МШП исчезает.

Для более подробного изучения процесса формирования режима МШП рассмотрим графики зависимостей $E_L, E_R(\theta)$, где θ — угол влета электронов в дисперсное пространство; $E_L, E_R(\theta)$ — энергии, при которых электроны с данным углом попадают в левый (L) и правый (R) края выходной диафрагмы для таких же параметров, как на рис. 2.

На рис. 3 представлены графики функций $E_L, E_R(\theta)$ при условии, что ВД помещена в положение МШП и совпадает с последней. Видно, что при совпадении центральной траектории пучка с центральной траекторией Ф2П и при отклонении центральной траектории пучка от центральной траектории Ф2П вправо с неплохой точностью выполняется соотношение

$$E_{L\max} = E_{R\min} = E_{L\text{end}},$$

где $E_{L\max}$ — значение энергии в максимуме функции $E_L(\theta)$, $E_{R\min}$ — значение энергии в минимуме функции $E_R(\theta)$, $E_{L\text{end}}$ — значение энергии E_L при наибольшем угле старта. А при отклонении влево также с неплохой точностью выполняется равенство

$$E_{R\text{beg}} = E_{L\max} = E_{R\min},$$

где $E_{R\text{beg}}$ — значение энергии E_R при наименьшем

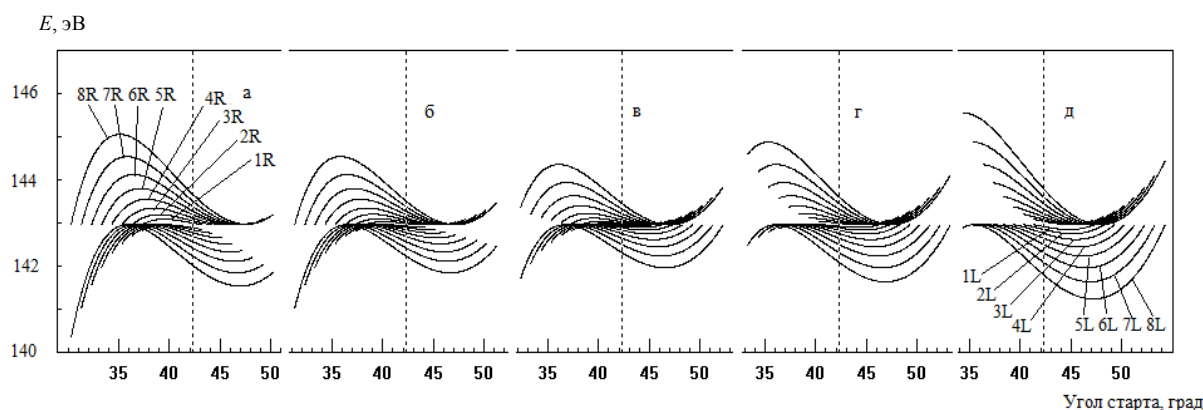


Рис. 3. Графики функций $E_L, E_R(\theta)$, построенные для различных отклонений центральной траектории от центральной траектории режима Ф2П, для которого фокусировка осуществляется на ось. Буквы и цифры на рисунках соответствуют тем же отклонениям и полуапертурам, что и на рис. 2. Буквы L и R указывают на то, что данная линия соответствует траекториям, попадающим в левый и правый края ВД

угле старта. Т. е. очень близко к условию существования режима МА, при нахождении параметров работы которого равенство всех четырех энергий задается в процессе вычислений. В каждом из вышеприведенных равенств не хватает только четвертого элемента E_{Rbeg} или E_{Lend} . Из этого следует, что режимы МШП и МА не эквивалентны.

Возникает вопрос: нельзя ли, сдвигая кромки апертуры, добиться того, чтобы условия существования МА выполнялись полностью? Оказалось, что для случая, представленного на рис. 3, в, это вполне возможно. Если для этого случая сдвинуть правую границу апертуры (θ_R) в сторону меньших значений угла, то после нескольких итераций удастся выполнить соотношение

$$E_{Rbeg} = E_{Lmax} = E_{Rmin} = E_{Lend}. \quad (1)$$

Это соотношение характерно для режима МА. Т. е., оставаясь в рамках режима МШП, удастся реализовать режим МА. Из этого следует, что множества МШП и МА имеют пересечение. Отметим, что при подобных итерациях после изменения апертуры, приходится находить новое положение МШП (Z_L, Z_R, P_y), устанавливать ВД в это положение и смотреть графики зависимостей $E_L, E_R(\theta)$.

Из вида функций $E_L, E_R(\theta)$ для МШП можно сделать определенный вывод относительно вида апертурного зазора (АЗ), который при определенных условиях пропорционален аппаратной функции (АФ) [1] — поэтому ниже будем обозначать эту величину АФ. АФ для МШП должна быть

довольно близка к АФ для МА. Для больших апертур, симметричных или почти симметричных относительно центральной траектории режима Ф2П (при этом выполняются соотношения $E_{Rbeg} < E_{Lmax}$ и $E_{Rmin} < E_{Lend}$) самая широкая часть АФ (основа пика, нижняя часть), если не рассматривать хвосты (крылья) пика, определяется разностью $E_{Rmax} - E_{Lmin}$ и одинакова для обоих режимов. Некоторая "нехватка" на кривой $E_R(\theta)$ для режима МШП скажется в том, что пик АФ будет в некоторых местах более узким и с более низкой вершиной.

Для тех же условий, для которых строились рис. 2, 3, представим вид АФ (см. рис. 4). Из приведенных на рис. 4 графиков АФ видно, что на графике (в), апертура которого наиболее близка к апертуре режима МА, пики АФ являются наиболее узкими. Кроме того, на этих пиках практически отсутствуют "хвосты". Подобное наблюдается на пиках МА (см. [1, 3]). При малых отклонениях центральной траектории от центральной траектории режима Ф2П пики АФ не очень значительно изменяют свою форму и мало прибавляют в своей ширине. А при больших отклонениях искажение формы и ширины пиков становятся значительными.

При исследовании ширины пика на полувысоте (ШППВ) оказалось, что зависимость ШППВ от угла старта центральной траектории имеет минимум, не совпадающий с углом старта центральной траектории для Ф2П. В минимуме ШППВ зависимости $E_L, E_R(\theta)$ приобретают вид, характерный для МА (т. е. при котором выполняется соотношение (1)).

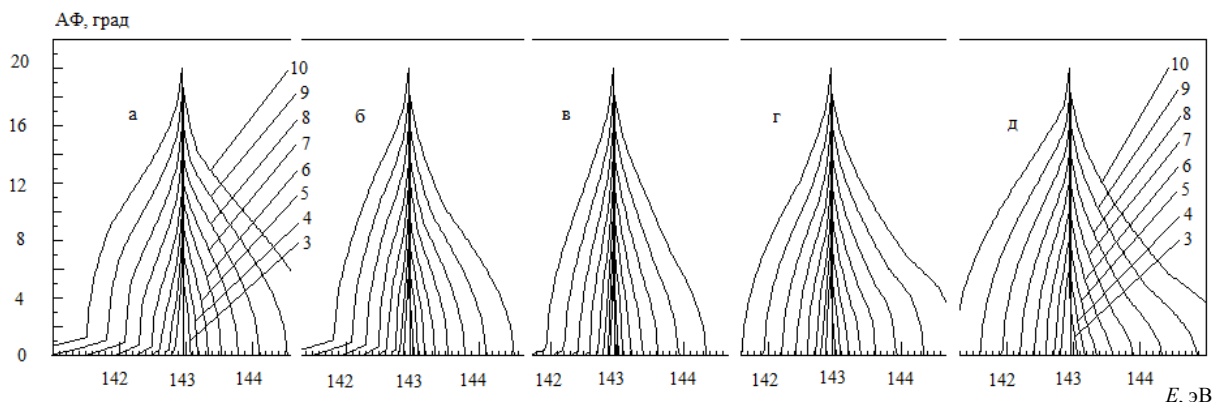


Рис. 4. Вид АФ для различных отклонений центральной траектории от центральной траектории режима Ф2П, для которого фокусировка осуществляется на ось. Буквы и цифры на рисунках соответствуют тем же величинам отклонения и полуапертуры, что на рис. 2 и 3

Был проведен поиск угла старта центральной траектории, при котором АФ имеет минимальную ШППВ. Например, для энергии пучка $E = E_{\text{эф}} = 142.9458964$ эВ, при которой фокусировка осуществляется на ось, МШП достигается при угле старта 42.2348° вместо угла Ф2П 42.3333 [18] или 42.3083° [19]. При этом оказывается, что выполняется равенство $E_{L\text{max}} = E_{R\text{min}} = 142.9458964$ эВ.

Вычислим углы, при которых линия $E = E_{\text{эф}}$ пересекает левое крыло кривой $E_R(\theta)$ (37.2369) и правое крыло кривой $E_L(\theta)$ (47.2340), и полученные результаты сравним с левым (37.2348) и правым (47.2348) углами апертуры. Видно, что совпадение соответствующих углов довольно хорошее. Это говорит о том, что при угле старта центральной траектории, при котором ШППВ АФ достигает минимума, реализуется режим МА. Таким образом, среди всех возможных режимов МШП лучшим с точки зрения разрешения является режим МА.

Нам остается еще обсудить и понять возможные причины расхождения вида АЗ (АФ) в режиме МШП, полученной в данной работе и в [8, 9]. Как нами ранее указывалось, в [8, 9] использовалось слишком малое число возможных энергий (слишком малое разбиение диапазона энергий). Когда на весь пик приходится всего три точки (одна на вершину и две на сторонах пика [8]), то ясно, что этого явно недостаточно. Но, с другой стороны, таким малым (редким) разбиением диапазона энергий нельзя объяснить раздвоение пика АФ при переходе от режима Ф2П к режиму МШП. О точности используемых в [5, 8, 9] алгоритмов, не только количественной, но и качественной, можно судить по виду АФ, который был получен в [9] для фокусировки первого порядка ([9, рис. 6]). Во-первых, этот вид не совпадает с видом, полученным в [1, 17], и, во-вторых, хвосты АФ могут быть направлены не только в одну сторону, но, как показано в [1], могут быть направлены как в сторону больших, так и в сторону меньших энергий.

Если проанализировать вид АФ на рис. 6 работы [8], то можно сделать вывод, что апертура выбрана намного большая, чем это требуется как для функционирования режима Ф2П, так и для МШП (МА). Если при такой апертуре поместить ВД в место расположения МШП (или МА), размер ВД выбрать равным проекции МШП на ось Z, то АФ должна получиться типа рис. 7–9 работы [1].

Если же ВД поместить в положение МШП, но размер ВД выбрать меньшим (или намного меньшим) величины МШП (см. [1, рис. 8, в]), то, анализируя кривые $E_L, E_R(\theta)$, можно прийти к выводу, что в случае, когда размер ВД становится меньшим МШП, область $E_R(\theta) - E_L(\theta)$ становит-

ся неодносвязной вдоль переменной Z. Последнее возможно, только если $E_{L\text{max}} > E_{R\text{min}}$. Поэтому пик АФ разбивается на 2 пика (2 вершины). Однако вид полученной АФ мало походит на то, что было получено в [8, 9]. Это, на наш взгляд, является результатом различных допущений, принятых в [5, 8, 9] при разработке алгоритма построения АФ. Детали этого алгоритма не были описаны в этих работах, поэтому невозможно сказать, какое допущение, к чему привело.

Вид АФ, близкий к полученному в [1] и в представленной работе, приведен в [16]. Правда, интерпретация пиков в [16] неверна. Согласно результатам работы [1] (см. [1, рис. 8]), правый пик на рис. 11 работы [16] соответствует случаю двух фокусировок первого порядка, средний — режиму МА (или МШП), а левый — любому режиму между Ф2П и МА при условии, что ВД выставлена большей МШП.

Кроме этого, приведем результаты расчета АФ с помощью алгоритма, который в работе [3] использовался исключительно для проверки результатов. Вся суть этого алгоритма состоит в проверке выполнения условия попадания электронов в зазор ВД и накоплении для каждой энергии числа

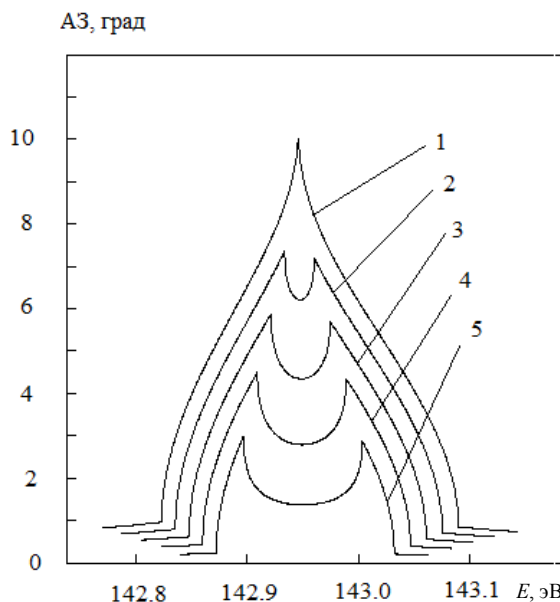


Рис. 5. Графики АФ, когда ВД удалена от оси на такое же расстояние P_y , что и МШП, центр ВД совпадает с центром МШП. Зазор ВД выбран равным d_y (кривая 1), $0.8 \cdot d_y$ (2), $0.6 \cdot d_y$ (3), $0.4 \cdot d_y$ (4), $0.2 \cdot d_y$ (5), где d_y — величина МШП для полуапертуры, равной 5°

попавших в ВД траекторий. На рис. 5 приведены результаты такого расчета. Для полуапертуры, равной 5° , и центральной траектории, совпадающей с центральной траекторией Ф2П, имеющей фокусировку второго порядка на ось, была найдена МШП с некоторой шириной d . В место ее нахождения поочередно помещались диафрагмы с центром в центре МШП и шириной d , $0.8 \cdot d$, $0.6 \cdot d$, $0.4 \cdot d$, $0.2 \cdot d$. Максимальное число попавших в ВД траекторий при ширине ВД, равной d , было пронормировано на величину максимума пика АФ, равного 10° .

В результате получилось, что, только когда диафрагма находится в месте нахождения МШП и ширина ВД равна МШП (или больше нее см. [1, рис. 8]), пик имеет одну вершину. В случае, когда ширина ВД меньше МШП, АФ имеет две явно выраженные вершины. Интерпретация пиков АФ, состоящих из двух вершин, приведена в [1]. Эти две вершины соответствуют двум фокусировкам первого порядка. Для фокусировки первого порядка правильный вид АФ получен в [1, 17]. Перешеек между вершинами определяется суммой правой части левого пика и левой части правого пика. Левый и правый хвосты всего пика определяются левым хвостом правого пика (левый) и правым хвостом левого пика (правый).

РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОЙ АПЕРТУРЫ

Для изучения режима МА используем рассмотрение пропускания в пространстве энергия—угол. В [14] этот метод был применен для несколько модифицированного ЦЗ. И несмотря на то что в [14] не было прямо указано, что получаемая апертура является максимальной, проведенное в данной работе построение ясно указывает, что АФ строилась именно в режиме МА. Полученная в [14] АФ имеет вид колоколообразного пика с гладкой вершиной. В [1] и в настоящей работе (рис. 5) пик АФ имеет также колоколообразную форму, но острую вершину.

Режим МА уже изучался нами в [1] при условии, что ВД находится на оси. При этом производился поиск на графике зависимостей $E_L, E_R(\theta)$ такого положения находящейся на оси ВД (такого расстояния от источника), для которого выполнялось равенство $E_{L\max} = E_{R\min}$. Для этого положения ВД находилась апертура (левый и правый углы влета электронов в дисперсное пространство).

В данной работе мы ставим ВД на некотором расстоянии от оси (P_y) и используем другой метод определения условий реализации режима МА: фиксируем потенциал на верхнем электроде и энергию пучка электронов (центральной траектории). Для различных величин зазора ВД (этим

задаются расстояние от источника до левого Z_L и правого Z_R краев ВД и величина зазора ВД d_y), перебирая значения P_y , вычисляем и строим графики функций $E_L, E_R(\theta)$. Из всех пар $E_L(\theta), E_R(\theta)$ выбираем такую (найденную при таком P_y), для которой выполняется равенство $E_{L\max} = E_{R\min}$. Линию $E = E_{L\max} = E_{R\min}$ продолжим влево до пересечения с кривой $E_R(\theta)$ (точка θ_R — правая граница апертуры) и вправо до пересечения с кривой $E_L(\theta)$ (точка θ_L — левая граница апертуры).

Теперь, когда мы знаем параметры режима МА ($P_y, Z_L, Z_R, \theta_L, \theta_R$), можно для таких же стартовых параметров вычислить положение МШП, т. е. величины (Z_L, Z_R, P_y). Для этого задаем (E, θ_L, θ_R), заданные или найденные для МА, и применяем описанный выше алгоритм поиска МШП. В результате работы этого алгоритма получаем величины (Z_L, Z_R, P_y) для МШП. Вычисления проводились для положений ВД в диапазоне от $0.9L_{e2f}$ до $1.1L_{e2f}$ с шагом $0.2L_{e2f}/20$ и при величинах зазора ВД, равных 0.33, 0.1, 0.033 и 0.01 мм. Величины (Z_L, Z_R, P_y) для режимов МА и МШП приведены в табл. 2 для зазора ВД, равного 0.1 мм, и с шагом $0.2L_{e2f}/10$, т. е. через одно значение положения ВД.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что для режимов МА и МШП, имеющих одинаковые стартовые условия, радиус, левый и правый края ВД совпадают. Это дает основание сделать вывод, что всякий режим МА является режимом МШП (режим МА является подмножеством МШП в том смысле, что множество параметров всех реализаций МА для данной геометрии является подмножеством параметров всех реализаций МШП).

Причем, как это следует из вышеприведенных данных, режим МА имеет самый узкий пик АФ и, следовательно, наилучшее разрешение из всех возможных режимов МШП.

Кроме того, среди режимов МШП встречаются такие режимы, для которых на АФ появляются "хвосты" (см. рис. 4). А в режиме МА, как это следует из [1], таких хвостов практически нет.

Поэтому наибольший интерес представляет не МШП для пучка, реализующего Ф2П, а режим МА, который является частным случаем режима МШП и который имеет наименее узкий пик АФ.

Для режима МА вычислим функцию удаления ВД от оси в зависимости от расстояния до источника (см. рис. 6) для разных значений зазора ВД.

Табл. 2. Результаты расчета для режима МА радиуса, левого и правого краев ВД и для этого же пучка (та же энергия и апертура) результаты расчета для режима МШП радиуса, левого и правого краев пучка в месте его НШП

№ положения ВД	$E, \text{эВ}$	$P_y^{\text{МА}}, \text{мм}$	$P_y^{\text{МШП}}, \text{мм}$	$Z_L^{\text{МА}}, \text{мм}$	$Z_L^{\text{МШП}}, \text{мм}$	$Z_R^{\text{МА}}, \text{мм}$	$Z_R^{\text{МШП}}, \text{мм}$
1	139.28819	3.0679	3.0679	116.3227	116.3227	116.4227	116.4227
3	140.13532	2.5493	2.5493	117.5477	117.5478	117.6477	117.6479
5	140.97583	2.0286	2.0286	118.7727	118.7727	118.8727	118.8727
7	141.80983	1.5059	1.5059	119.9977	119.9976	120.0977	120.0976
9	142.63740	0.9812	0.9812	121.2226	121.2226	121.3226	121.3226
11	143.45865	0.4545	0.4545	122.4476	122.4476	122.5476	122.5476
13	144.27365	-0.0742	-0.0741	123.6726	123.6725	123.7726	123.7725
15	145.08251	-0.6048	-0.6048	124.8976	124.8976	124.9976	124.9976
17	145.88531	-1.1374	-1.1374	126.1226	126.1225	126.2226	126.2225
19	146.68213	-1.6719	-1.6720	127.3475	127.3571	127.4475	127.4580
21	147.47307	-2.2084	-2.2084	128.5725	128.5725	128.6725	128.6725

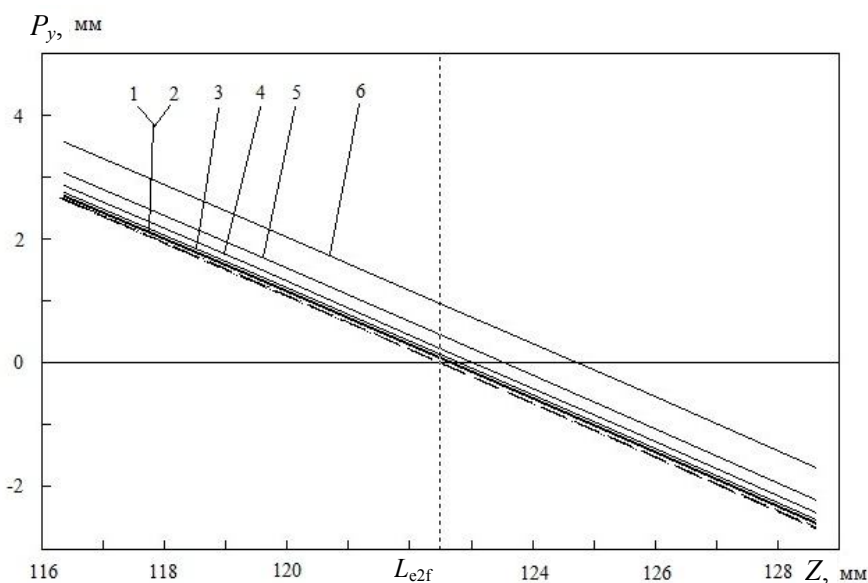


Рис. 6. Графики удаления ВД (P_y) от оси Z , для которого реализуется режим МА, в зависимости от положения ВД для различных величин зазора ВД. Цифрам на рисунке соответствуют следующие величины зазора ВД (в мм): 1 соответствует зазору ВД, равному 0.001, 2 — 0.0033, 3 — 0.01, 4 — 0.033, 5 — 0.1, 6 — 0.33. Штриховая линия — линия фокусов. Пояснения в тексте

На рис. 6 представлены графики зависимости удаления ВД P_y от оси Z , на котором выполняется режим МА, в зависимости от расстояния ВД от источника электронов при фиксированных на каждой линии, но разных значениях величины зазора ВД. Штриховой линией показана линия фокусов, которая в [20] определена как "геометрическое место угловых фокусов, соответствующих различным энергиям частиц". Для отображения линии фокусов использовались формулы работы [20], в одну из которых (расстояние МШП от оси) вкралась неточность (опечатка). Поэтому приведем

исправленную формулу для расстояния от оси (P_y) и формулу для расстояния от источника (Z):

$$P_y = r_1 (2 + 4pT \sin^2 \theta - p(1 + 2pT) \cos^2 \theta),$$

$$Z = L_{\text{эф}} - (P_y + 4r_1(p_0 T_0 - pT)) \text{ctg} \theta,$$

где θ — угол старта центральной траектории; $p = \sqrt{w/ea} \sin \theta$; e — заряд электрона; $w = mv_0^2/2$ — кинетическая энергия электрона до попадания в диспергирующее поле; $a = U/\ln(r_2/r_1)$, U — разность потенциалов между

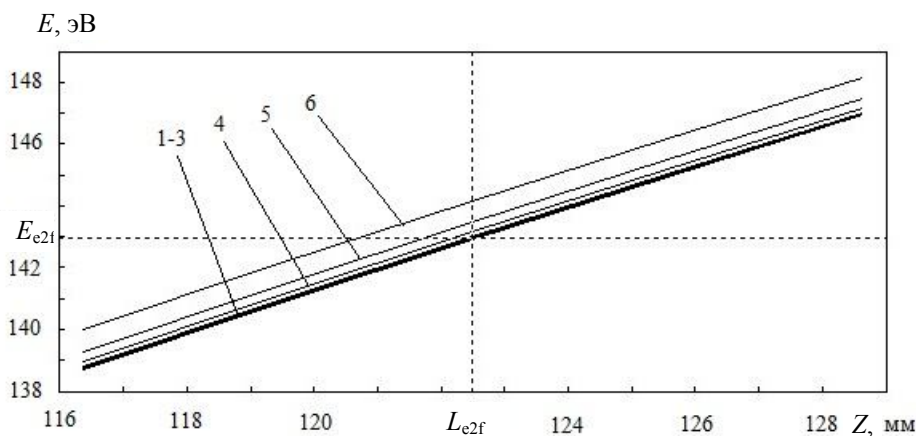


Рис. 7. Зависимость энергии фокусировки от удаления ВД от источника. Цифрам на рисунке соответствуют те же величины зазора ВД, что и на рис. 6. Пояснения в тексте

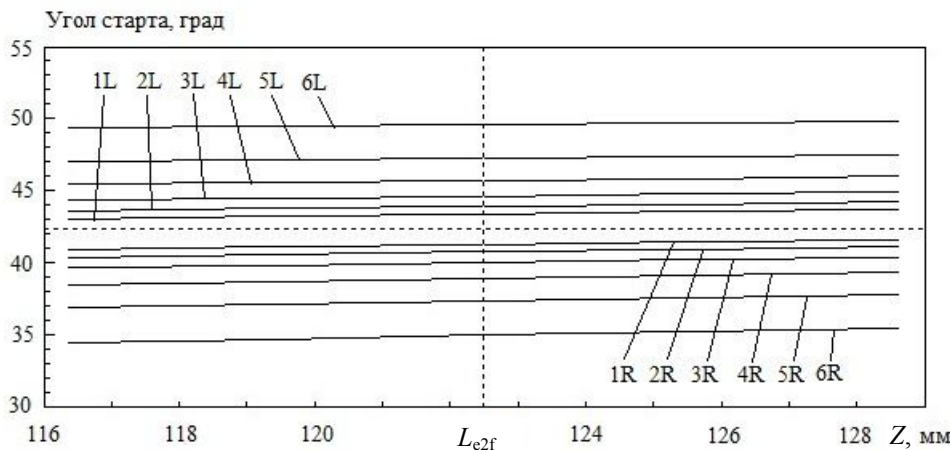


Рис. 8. Зависимость левого (L) и правого (R) краев апертуры при реализации режима МА от удаления ВД от источника. Цифрам на рисунке соответствуют те же величины зазора ВД, что и на рис. 6. Пояснения в тексте

электродами ЦЗ; $T(p) = e^{p^2} \int_0^p e^{-z^2} dz$; T_0, p_0 — соответствуют попаданию центральной траектории в точку фокуса, находящуюся на оси.

Из рис. 6 видно, что для разных величин зазора ВД линии, показывающие зависимость величины удаления МА от оси Z , представляют собой практически прямые линии, почти параллельные друг другу. При стремлении величины зазора ВД к нулю линии, показанные на рис. 6, стремятся к линии фокусов второго порядка. Эти линии будем называть линиями максимальной апертуры (МА) и придавать им смысл, что при нахождении на них реализуется максимальная для данной ВД апертура.

При рассмотрении показанной на рис. 7 зависимости энергии фокусировки от удаления ВД от источника можно отметить, что линии, соответствующие различным величинам зазора ВД, пред-

ставляют собой практически прямые линии, параллельные друг другу. Линия, соответствующая малому зазору ВД 0.001 мм, проходит через точку (L_{e2f}, E_{e2f}) , что указывает на то, что в пределе малых зазоров ВД режим МА стремится к режиму Ф2П.

Для того чтобы анализатор работал в режиме МА, необходимо для определенного положения (удаления от источника и от оси) и величины (зазора) ВД установить апертуру. Величина апертуры определяется графиками, представленными на рис. 8. Видно, что линии, соответствующие краям апертуры, почти параллельны друг другу, но не параллельны прямой $\theta = \theta_{e2f}$, представляющей угол старта центральной траектории Ф2П пучка, фокусирующегося на ось. Поэтому рассмотрим зависимость угла старта центральной траектории от положения ВД при реализации режима МА (рис. 9).

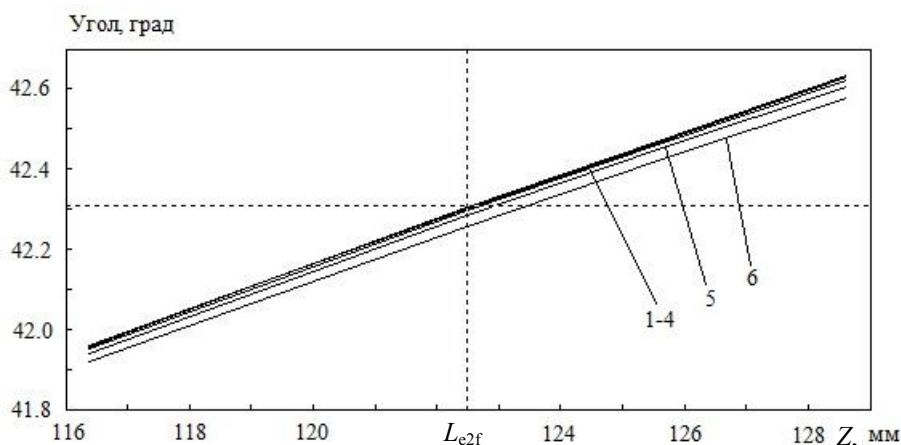


Рис. 9. Графики зависимости угла старта центральной траектории пучка электронов от расстояния источника до ВД при реализации режима МА, построенные для различных величин зазора ВД. Цифрам на рисунке соответствуют те же величины зазора ВД, что и на рис. 6–8. Горизонтальная пунктирная линия отображает θ_{e2f} — угол старта центральной траектории режима Ф2П, когда фокусировка осуществляется на ось. Пояснения в тексте

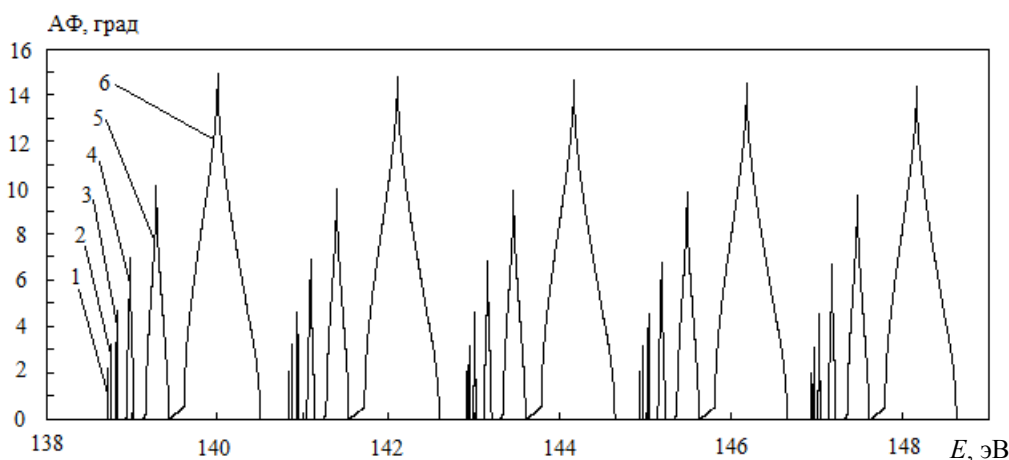


Рис. 10. Вид АФ. Цифрам на рисунке соответствуют те же величины зазора ВД, что и на рис. 6–9. Пояснения в тексте

На рис. 9 представлены графики зависимости угла старта центральной траектории пучка электронов от расстояния от источника до ВД, построенные для различных величин зазора ВД. Видно, что для очень малой величины зазора ВД (0.001 мм) линия угла старта практически проходит через точку (θ_{e2f}, L_{e2f}) , представляющую собой угол старта центральной траектории пучка, для которого реализуется фокусировка второго порядка на ось. При увеличении зазора ВД угол старта центральной траектории все более отличается в меньшую сторону от θ_{e2f} (графики лежат ниже). Это говорит о том, что наилучший из всех возможных режимов МШП (МА) имеет угол старта, отличный от угла старта режима Ф2П. Поэтому представленные в [6] формулы удаления (у нас это P_y) и ширины пучка (у нас это ширина ВД) для

МШП, не являются оптимальными, и их следует исправить на то, что представлено на рис. 7, 9. Для малых величин зазора ВД это отличие мало. Однако для больших величин зазора ВД это отличие уже нельзя игнорировать.

Вид АФ для различных величин зазора ВД, представлен на рис. 10. Вид АФ на рис. 10 дан для пяти значений положения ВД (расстояния от источника) и шести значений зазора ВД. Полученные пики АФ, также как в [1, 14, 16], имеют колоколообразный вид. На самых больших пиках АФ, соответствующих зазору ВД, равному 0.33 мм, видно появление малого хвоста со стороны меньших энергий. Это объясняется тем, что на графиках функций $E_L, E_R(\theta)$ левая часть функции $E_R(\theta)$ опускается ниже величины E_{Lmin} . Это можно исправить (т. е. убрать этот хвост), если меньший угол апертуры определять, продолжая

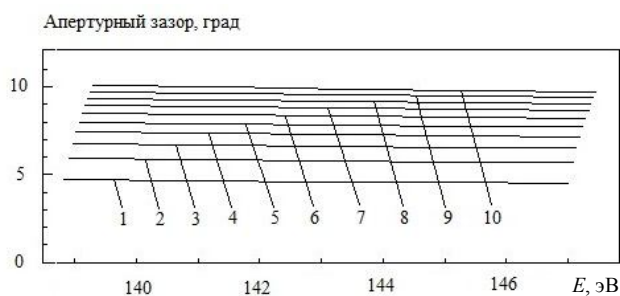


Рис. 11. Графики зависимости пропускания от энергии.

Цифрам на рисунке соответствуют следующие величины зазора ВД (в мм): 1 — 0.01, 2 — 0.02, ..., 9 — 0.09, 10 — 0.1 мм. Пояснения в тексте

на графике функций $E_L, E_R(\theta)$ линию $E = E_{L\min}$ влево до пересечения с кривой $E_R(\theta)$ и полученный угол используя в качестве правого (меньшего) угла апертуры.

На рис. 11 и 12 представлены графики зависимости пропускания (диапазона углов старта, при которых электроны проходят на детектор, — апертурного зазора) и разрешающей способности от энергии.

На каждой представленной на рис. 11 линии не только фиксирована величина зазора ВД, но, главное, реализуется режим МА. Т. е. при данной энергии выбирается такое расстояние от оси, при котором работает режим МА. В данном диапазоне энергий зависимость пропускания от энергии представляет собой практически прямую линию. Пропускание очень мало зависит от энергии.

Для вычисления разрешающей способности использовалась ШППВ. Каждая линия соответствует определенной величине раствора ВД. В данном диапазоне энергий зависимость пропускания от энергии представляет собой слаборастущую прямую линию.

Таким образом, исходя из данных, представленных на рис. 11, 12, можно по апертуре находить положение МА и, следовательно, положение и раствор оптимальной ВД.

Интересно изучить, как будет изменяться вид АФ при изменении различных параметров анализатора. К таким параметрам можно отнести апертуру (левый и правый край или угол центральной траектории и апертурный угловой зазор), ВД (расстояние от источника, от оси и ширина или координаты краев диафрагмы). В основном эти зависимости изучены в [1]. В представленной работе было изучено влияние величины зазора ВД на вид АФ (рис. 5) при условии, что ВД установлена в плоскости МШП и ее середина совпадает со средней МШП. Показано, что при уменьшении ВД

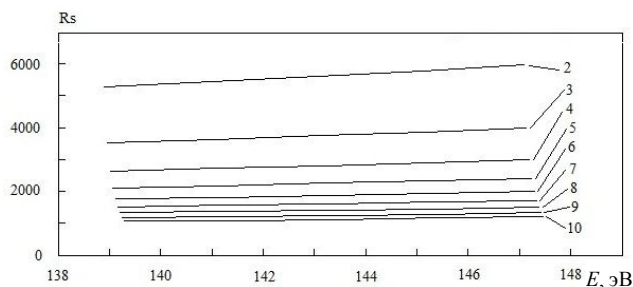


Рис. 12. Графики зависимости разрешающей способности (R_s) от энергии.

Цифрам на рисунке соответствуют те же величины зазора ВД, что и на рис. 11. Пояснения в тексте

меньше размера МШП пик АФ раздваивается.

В этом состоит кардинальное отличие Ф2П от МА (МШП). Пусть производится изменение некоторых параметров режима Ф2П, которые были первоначально установлены оптимальными (апертура, положение и ширина ВД). Для увеличения сигнала детектора можно увеличить апертуру и ширину ВД, при этом у пика АФ могут появиться хвосты (крылья), вершина пика АФ может стать плоской или несколько скошенной. Эти ухудшения не являются драматическими, хотя и нежелательными. Для улучшения разрешения можно уменьшить зазор ВД.

Совсем другое дело, когда реализуется режим МА. Если для улучшения разрешения попытаться уменьшить ширину ВД до величины, меньшей МШП, то пик АФ разбивается на два острых пика, соединенные "перешейком". Возможно, этот эффект можно объяснить тем, что все фокусировки, не являющиеся фокусировками первого или второго порядка, неустойчивы и "малым шевелением" распадаются на некоторую комбинацию этих двух фокусировок [21]. Поэтому линии, которые выше были названы линиями МА, можно рассматривать как границы раздела режимов работы ЦЗ: МА и двух фокусировок первого порядка.

Для улучшения разрешения можно предложить следующий алгоритм (последовательность действий) при том условии, что ЦЗ работает в режиме МА. Обращаемся сперва к рис. 12. Если двигаться вдоль линии $R_s(E)|_{d=\text{const}}$, то можно добиться весьма малого увеличения R_s . Поэтому для увеличения разрешающей способности необходимо перейти на линию, на которой $R_s = R_s^{\text{New}}$ больше, зазор ВД для этого требуется уменьшить $d \rightarrow d^{\text{New}}$. На рис. 5 при $P_y = \text{const}$ (из конструктивных соображений) переходим на линию $P_y(Z)$ с $d = d^{\text{New}}$. При этом Z изменяется на

Z^{New} . На рис. 6 находим точку пересечения линии $Z = Z^{\text{New}}$ с линией $E(Z)_{d=d^{\text{New}}}$. В этой точке определяется новая энергия E^{New} . Возвращаемся к рис. 12. При новой энергии $E = E^{\text{New}}$ разрешающая способность меняется слабо. В заключение с помощью рис. 11 определяем требуемый апертурный зазор и рис. 8 — правый и левый углы апертуры. Схематично этот алгоритм можно представить в следующем виде:

$$R_s^{\text{New}} \xrightarrow{12} d^{\text{New}} \xrightarrow{5} Z^{\text{New}} \xrightarrow{6} E^{\text{New}} \xrightarrow{11} \Delta\theta^{\text{New}} \xrightarrow{8} (\theta_L^{\text{New}}, \theta_R^{\text{New}}).$$

На этой схеме цифры над стрелками указывают на номер рисунка, с помощью которого осуществляется данное действие.

Примерно такой же алгоритм можно предложить для увеличения пропускания (апертурного зазора):

$$\Delta\theta^{\text{New}} \xrightarrow{8} (\theta_L^{\text{New}}, \theta_R^{\text{New}}) \xrightarrow{11} d^{\text{New}} \xrightarrow{5} Z^{\text{New}} \xrightarrow{6} E^{\text{New}} \xrightarrow{12} R_s^{\text{New}}.$$

ВЫВОДЫ

Таким образом, в представленной работе изучены два режима работы ЦЗ: МШП и МА и проведено их сравнение между собой.

И режим МШП, и режим МА имеют в качестве предельного режим Ф2П (МШП — при устремлении апертуры к нулю симметрично относительно центральной траектории имеющего такую же энергию режима Ф2П, а МА — при устремлении к нулю зазора ВД).

Показано, что зависимость ПШПВ режима МШП от угла старта центральной траектории имеет минимум при угле старта, не совпадающем с углом старта для режима Ф2П. В этом минимуме параметры режима МШП совпадают с параметрами режима МА.

Показано, что режим МА является частным случаем (подрежимом) режима МШП и среди всех возможных режимов МШП обладает самым узким пиком АФ (самым лучшим разрешением).

Раздвоение пика АФ в режиме МШП, полученное в [8, 9], не является свойством этого режима, а является следствием того, что режим МШП используется неверно. При выборе ВД, равной по ширине (проекции на ось Z) МШП и расположенной на расстоянии от источника и на удалении от оси, соответствующих МШП, АФ имеет вид монопика (см. рис. 5).

Оказалось, что если установить ВД в положение, в котором реализуется режим МА и варьировать параметры работы ЦЗ, то при некотором малом отклонении от параметров режима МА (повышение энергии, уменьшение ВД,...) пик АФ разбивается на два острых пика, соединенные "пе-

решейком". Этого неприятного эффекта можно избежать, если выбрать энергию центральной траектории меньше (следовательно — положение ВД ближе к источнику или к оси), чем требуется для режима МА.

Предложены алгоритмы, выполнение которых позволяет, оставаясь в рамках режима МА, повысить пропускание или увеличить разрешающую способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко С.И. Некоторые аспекты работы энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало. Ч. I // Научное приборостроение. 2011. Т. 21, № 1. С. 76–86.
2. Шевченко С.И. Некоторые аспекты работы энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало. Ч. II // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 2. С. 98–105.
3. Шевченко С.И. Метод вычисления аппаратной функции аксиальных электростатических энергоанализаторов // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 2. С. 73–81.
4. Hafner H., Simpson J.A., Kuyatt C.E. Comparison of the spherical deflector and the cylindrical mirror analyzer // Rev. Sci. Instrum. 1968. V. 39, N 1. P. 33–35.
5. Аксела С., Каррас М., Песса М., Суонинен Е. Исследование электронно-оптических свойств электронного спектрометра с коаксиальными цилиндрическими электродами // ПНИ. 1970. Т. 41, № 3. С. 41–45.
6. Sar-El H.Z. Criterion for comparing analyzers // Rev. Sci. Instrum. 1970. V. 41, N 4. P. 561–564.
7. Заиквара В.В. Фокусировка пучка заряженных частиц конечной угловой расходимости в электростатическом анализаторе типа цилиндрического зеркала // ЖТФ. 1971. Т. 41, № 1. С. 193–197.
8. Аксела С. Анализ энергетического распределения в цилиндрических спектрометрах электронов // ПНИ. 1971. Т. 42, № 6. С. 61–63.
9. Аксела С. Аппаратная функция цилиндрического анализатора энергий электронов // ПНИ. 1972. Т. 43, № 9. С. 122–128.
10. Risley J.S. Design parameters for the cylindrical mirror energy analyzer // Rev. Sci. Instrum. V. 43, N 1. P. 96–103.
11. Дрейпер Ли Чжень-И. Характеристики анализаторов типа цилиндрическое зеркало с геометрией "кольцо-ось", "ось-ось" и "n=1.5" при конечных размерах источника и щели для углов средней траектории 30–65 // ПТИ. 1967. № 7. С. 138–154.
12. Sickafus E. Transmission properties of a cylindrical mirror analyzer viewed in energy-angle space // Rev. Sci. Instrum. 1977. V. 48, N 10. P. 1269–1277.
13. Горелик В.А., Протопопов О.Д. Предельные возможности цилиндрического зеркального энергоанализатора // Электронная техника. 1980. Сер. 7. Вып. 98, № 1. С. 127–131.
14. Trubitsyn A.A. A cylindrical mirror analyzer with high energy resolution // J. Elec. Spectr. Rel. Phen. 1995.

- V. 73. P. 305–310.
15. *Bishop A., Coad J.P., Riviere J.C.* A design for a cylindrical mirror analyzer for use in auger spectroscopy // *J. El. Spectr. Rel. Phenomena*. 1972/73. N 1. P. 389–401.
 16. *Siuda R.* Dependence of cylindrical mirror analyzer resolution on the geometry of the measurements // *J. El. Spectr. Rel. Phenomena*. 1991. V. 56. P. 12–32.
 17. *Голиков Ю.К., Краснова И.А., Марциновский И.А.* Об аппаратной функции электростатических электронных спектрометров // *Научное приборостроение*. 2011. Т. 21, № 3. С. 68–82.
 18. *Заишквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С.* Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // *ЖТФ*. 1966. Т. 36, № 1. С. 132–137.
 19. *Sar-El H.Z.* Cylindrical capacitor as an analyzer. I. Nonrelativistic part // *Rev. Sci. Instrum.* 1967. V. 38, N 9. P. 1210–1216.
 20. *Заишквара В.В., Ашимбаева Б.У.* Корректор линии фокусов электростатического зеркала с полем, близким к цилиндрическому // *ЖТФ*. 1966. Т. 36, № 1. С. 1755–1759.
 21. *Щербаков А.П.* Каустики семейства траекторий на плоскости и фокусировка пучков заряженных частиц // *Математические методы исследования сложных систем*. (Коллективная монография). СПб.: Изд-во СПбГУСЭ, 2009. С. 142–152.

**Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург**

Контакты: *Шевченко Сергей Иванович*,
shevsi@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 29.04.2013

SOME ASPECTS OF THE ENERGY ANALYZER WORK OF A CYLINDRICAL MIRROR TYPE. PART III

S. I. Shevchenko

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

Two modes of cylindrical mirror type energy analyzer work: the minimum trace width mode and the mode in which the optimal aperture is the maximum one are investigated. It is shown that the last mode is one of the realizations of the minimum trace width mode. It is shown that with the right choice of the gap the output diaphragm, apparatus function in the minimum trace width mode has only one peak.

Keywords: axially energy analyzer, cylindrical mirror analyzer (CMA), apparatus function (AF), minimum trace width, resolving power, transmission