

УДК 517.956.225: 621.319.7

© С. И. Шевченко

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА ТИПА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО. Ч. II

Рассмотрены два метода развертки в цилиндрическом энергоанализаторе: развертка по положению выходной диафрагмы и развертка по потенциалу верхнего электрода. Показано, что развертка по положению выходной диафрагмы (ВД) имеет ряд особенностей, которые могут усложнить обработку получаемого спектра, а развертка по потенциалу верхнего электрода с ВД, расположенной в точке выполнения фокусировки второго порядка, легка в исполнении и в интерпретации спектров.

Кл. сл.: аксиальный энергоанализатор, аппаратная функция, разрешающая способность, пропускание

ВВЕДЕНИЕ

Представленная работа является продолжением работы [1], которую ниже будем цитировать как Ч1.

Как было показано в Ч1, во всех режимах фокусировки в цилиндрическом энергоанализаторе выбором углов входа пучка электронов (или других заряженных частиц) в дисперсионное пространство можно практически убрать хвосты пиков аппаратной функции.

Рассмотрим применяемую при исследовании электронных энергоанализаторов терминологию. Считаем, как и ранее, источник электронов точечным и находящимся на оси.

Основными характеристиками электронных энергоанализаторов являются его разрешающая способность и пропускная способность.

Для характеристики разрешающей способности применяется разрешение на полувысоте $\rho = \Delta E / E$ или разрешающая сила (разрешающая способность) $R = 1 / \rho = E / \Delta E$, где E — энергия пика аппаратной функции (его вершины), ΔE — ширина пика на полувысоте. Эти термины являются устоявшимися.

Для характеристики пропускной способности ЭА существуют несколько терминов — светосила, аппаратная функция, пропускание. Светосила определяется как отношение телесного угла старта электронов, которые попадают в зазор выходной диафрагмы (ВД) и регистрируются детектором (диапазон углов старта, выраженный в радианах и умноженный на полный азимутальный диапазон 2π), к полному телесному углу старта электронов, выраженное в процентах. Если в качестве полного телесного угла старта электронов в [2, 3] использовался полный телесный угол 4π , то в настоящее время используется половина полного те-

лесного угла (2π — полусфера) (см., например, [4]).

В случае цилиндрического зеркала (ЦЗ) для телесного угла старта электронов, которые попадают в зазор ВД, можно выписать формулу

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\theta_R}^{\theta_L} \sin \theta d\theta = 4\pi \sin \frac{\theta_L + \theta_R}{2} \sin \frac{\theta_L - \theta_R}{2}.$$

Обозначим $\theta = (\theta_L + \theta_R)/2$ — средний угол полого конического пучка в ЦЗ, $\alpha = (\theta_L - \theta_R)/2$ — угол полураствора этого пучка, тогда для случая малого угла полураствора получаем для телесного угла $\Omega = 4\pi\alpha \sin \theta = 2\pi \sin \theta (\theta_L - \theta_R)$. Если учесть, что (как показано далее) средний угол полого конического пучка мало зависит от энергии (в рассматриваемом в данной работе диапазоне энергий), то получается, что зависимость рассматриваемого телесного угла от энергии полностью определяется углом раствора пучка $(\theta_L - \theta_R)$.

Делим полученный телесный угол на половину полного телесного угла, выражаем в процентах и получаем светосилу: $S = 100\% (\theta_L - \theta_R) \sin \theta$. Т. е. светосила пропорциональна углу раствора пучка электронов, регистрируемых детектором.

Аппаратная функция (приборная линия, АФ) представляет собой (согласно [3]) зависимость тока на детекторе от энергии электронов на входе при моноэнергетичном источнике. В предположении об изотропности источника получается, что АФ пропорциональна уже описанному телесному углу, т. е. углу раствора пучка на входе.

В [2] АФ пропорциональна зависимости тока на детекторе от энергии электронов на входе, а для определения константы этой пропорциональности вводится дополнительное условие нормировки.

Если для нормировки приравнять АФ в вершине пика к величине максимального (для рассматриваемой энергии) апертурного зазора (в градусах), то получим, что АФ равна зависимости апертурного зазора от энергии вершины пика АФ.

Пропускание спектрометра равно отношению потока электронов, фиксируемых детектором, к потоку электронов, испускаемых источником при оптимальной напряженности электрического поля. По-видимому, имеется в виду, что осуществляется развертка по потенциалу верхнего электрода ЦЗ. В этом случае для изотропного источника поток электронов при оптимальной напряженности электрического поля соответствует потоку электронов в вершине пика АФ, который пропорционален максимальному углу раствора пучка ($\theta_L - \theta_R$) в этом пике. Т. е. пропускание пропорционально максимальному углу раствора пучка электронов, регистрируемых детектором, измеренному в точке старта.

РАЗВЕРТКА ПО ПОЛОЖЕНИЮ ВЫХОДНОЙ ДИАФРАГМЫ

Под разверткой по положению ВД мы имеем в виду многодетекторный анализ энергетического спектра электронов или реализацию электронного спектрографа, когда вместо одной ВД применяется совокупность ВД, за каждой из которых ставится детектор, и при измерениях одновременно снимается часть или весь энергетический спектр электронов.

В данной работе рассмотрим параметры работы энергоанализатора при фиксированном потенциале на верхнем электроде ЦЗ, равном -100 В, и изменении расстояния от источника электронов до (середины) зазора выходной диафрагмы (И—ВД) в диапазоне от $0.95L_{2f}$ до расстояния, при котором реализуется фокусировка по углу второго порядка, L_{2f} .

При расстояниях И—ВД, меньших L_{2f} , строго говоря, согласно определению (см. [5]), не существует фокусировки. Однако электроны группируются, и на графике аппаратной функции виден хорошо выраженный пик (см. Ч1: рис. 1, в, и рис. 10). Для этого режима вполне можно было бы применить термин "квазифокусировка". В этом режиме при переходе к оптимальным углам входа в дисперсионное пространство изменение ширины пика аппаратной функции на полувысоте (ШППВ) весьма значительно (см. Ч1: рис. 10). Это можно объяснить тем, что в этом режиме сами хвосты расположены не на периферийной части пиков, а начинаются практически от вершины пика. Для демонстрации этого эффекта на рис. 1 представлены графики АФ (с нормировкой в вершине пика

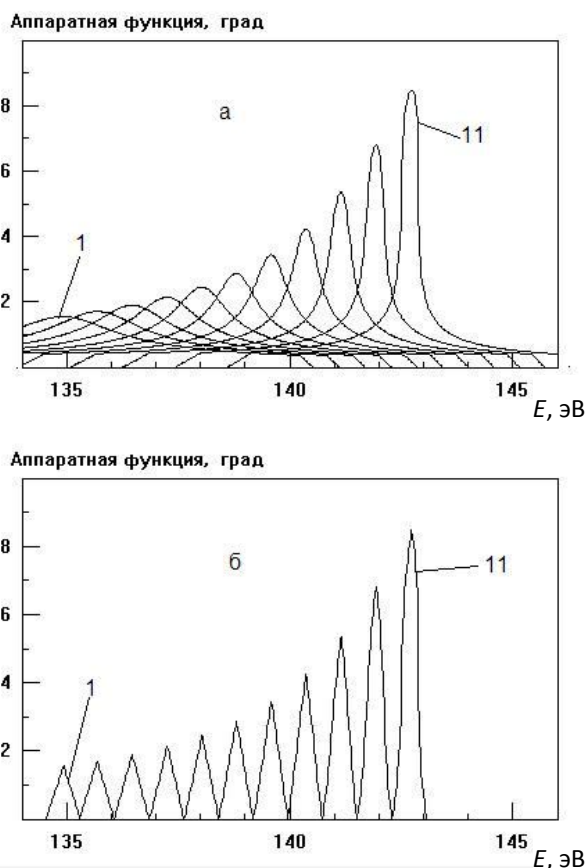


Рис. 1. Графики АФ.

а — при углах входа электронов в дисперсионное пространство, больших оптимальных; б — при углах входа электронов в дисперсионное пространство, равных оптимальным. Подробности в тексте

на максимальный угловой зазор), построенные в диапазоне расстояния И—ВД от $0.95L_{2f}$ до L_{2f} , который разбит на 10 частей (11 точек, в которых располагается середина ВД). На рис. 1, а и б, каждый пик АФ соответствует определенному расстоянию И—ВД: цифре 1 соответствует расстояние, равное $0.95L_{2f}$, а цифре 11 — расстояние L_{2f} . Из рис. 1 видно, что переход к оптимальным углам апертуры не только убирает хвосты пиков АФ, но и в режиме отсутствия фокусировки может заметно уменьшить ШППВ. Поэтому ясна ценность знания оптимальных углов.

Отметим, что пики АФ имеют треугольную форму только при углах входа электронов в дисперсионное пространство, равных оптимальным, при условии, что расстояние И—ВД меньше, чем L_{2f} .

Графики зависимости оптимальных углов влета электронов в дисперсионное пространство от энергии вершины пика АФ (по сути — от анали-

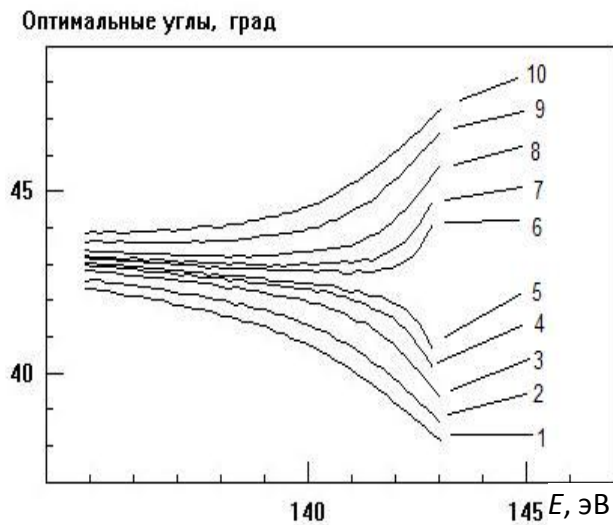


Рис. 2. Графики зависимости оптимальных углов от энергии вершины пика АФ на входе (от расстояния И—ВД).
Графики 1–5 соответствуют меньшим (правым) оптимальным углам апертуры и величинам зазора выходной диафрагмы 0.03 (1), 0.02 (2), 0.01 (3), 0.005 (4), 0.0025 мм (5). Графики 6–10 соответствуют большим (левым) оптимальным углам апертуры и величинам зазора выходной диафрагмы 0.0025 (6), 0.005 (7), 0.01 (8), 0.02 (9), 0.03 мм (10)

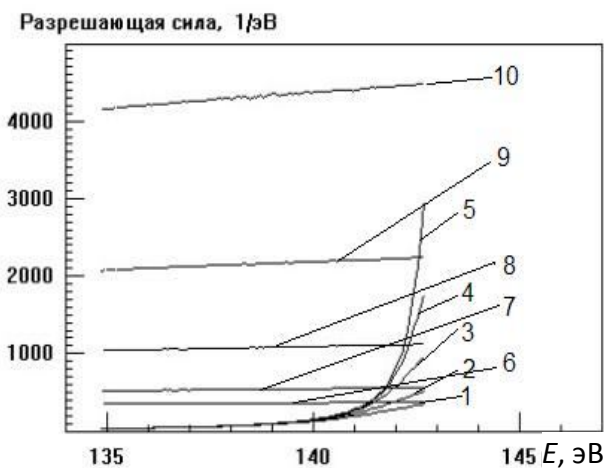


Рис. 3. Графики зависимости разрешающей силы (способности) от энергии вершины пика АФ при различных величинах зазора ВД.
Графики 1–5 соответствуют случаю, когда апертура постоянна для всего диапазона энергий и больше оптимальной и зазор ВД равен 0.03 (1), 0.02 (2), 0.01 (3), 0.005 (4), 0.0025 мм (5). Графики 6–10 соответствуют случаю, когда апертура выставляется для каждой энергии оптимальной в соответствии с графиками рис. 2 и зазор ВД равен 0.03 (6), 0.02 (7), 0.01 (8), 0.005 (9), 0.0025 мм (10)

зируемой энергии) представлены на рис. 2. Подчеркнем, что по оси абсцисс отложено не расстояние И—ВД, а соответствующая ему энергия вершины пика АФ. Это объясняется тем, что при проектировании электронного энергоанализатора сначала задается диапазон энергий (или значения энергии), в пределах которого необходимо снимать спектр, а затем уже по этому диапазону выбираются остальные параметры ЦЗ, в том числе положение ВД. Для этого можно применять графики, подобные рис. 1, б.

На рис. 2, так же как на предыдущем (рис. 1), положение ВД (расстояние И—ВД) изменяется от $0.95L_{2f}$ до L_{2f} . Этот диапазон разделен на 100 отрезков (101 положение ВД).

Величина апертурной диафрагмы при определенной энергии (определенном расстоянии И—ВД) и определенном зазоре ВД должна выбираться как значения углов меньшей и большей величины θ_R и θ_L . Эти величины определяются как точки пересечения прямой (вертикальной) линии $E = E_0$ и каждой из кривых 1–5 и 6–10 на графиках рис. 2.

Видно, что когда энергия вершины пика АФ приближается к энергии фокусировки второго порядка, а, значит, соответствующее расстояние И—ВД приближается к значению L_{2f} (правый край каждой кривой), апертурный зазор оптимальных углов значительно расширяется.

Зависимость разрешающей силы (способности) от энергии вершины пика АФ можно видеть на графиках рис. 3.

Из рис. 3 следует, что, с одной стороны, разрешающая сила при оптимальной апертуре является заметно большей, чем при апертуре, большей оптимальной. С другой стороны, разрешающая способность при оптимальной апертуре является практически постоянной (особенно при малых значениях разрешающей силы, меньших 1000 1/эВ) при изменении энергии вершины пика АФ, т. е. при разных значениях расстояния И—ВД.

На рис. 4 представлены графики зависимости диапазона оптимальных углов (оптимального углового зазора) от энергии вершины пика АФ при различных значениях зазора ВД. Видно, что при приближении расстояния И—ВД к L_{2f} (приближении энергии вершины пика АФ к энергии фокусировки второго порядка — правый край каждой кривой на рис. 4) пропускание (пропорциональное ему значение оптимального углового зазора) значительно увеличивается.

И еще хотелось бы высказать замечание: до сих пор в некоторых работах (см., например, [4]) для оценки ширины АФ используется ширина АФ по основанию. Вид графиков на рис. 1, а, показывает,

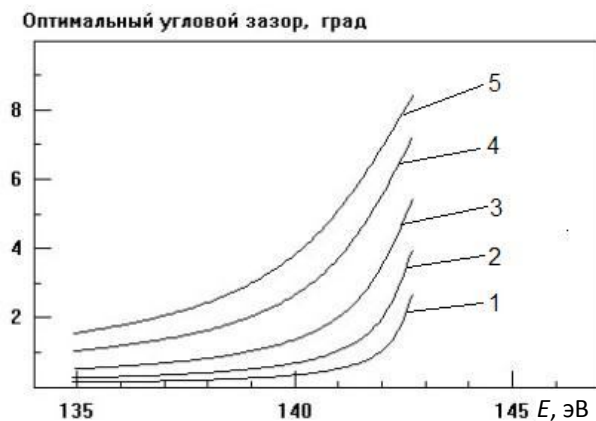


Рис. 4. Графики зависимости диапазона (зазора) оптимальных углов (оптимального углового зазора) от энергии вершины пика АФ (расстояния И—ВД) при различных значениях зазора ВД: 1 — 0.03, 2 — 0.02, 3 — 0.01, 4 — 0.005, 5 — 0.0025 мм

что это, мягко говоря, не дает никакой оценки действительного разрешения спектрального прибора. Только если установлены оптимальные апертурные углы и графики АФ приобретают вид, показанный на рис. 1, б, рассмотрение ширины пика АФ по основанию имеет смысл.

РАЗВЕРТКА ПО ПОТЕНЦИАЛУ ВЕРХНЕГО ЭЛЕКТРОДА

Для рассмотрения различных случаев развертки по потенциалу нам понадобятся графики АФ, построенные при апертурных углах, больших оптимальных, при апертурных углах, равных оптимальным, значения оптимальных углов в зависимости от энергии вершины пика АФ и величины разрешающей способности в зависимости от энергии вершины пика АФ. Поэтому эти графики мы будем представлять для различных случаев в блоках по четыре графика.

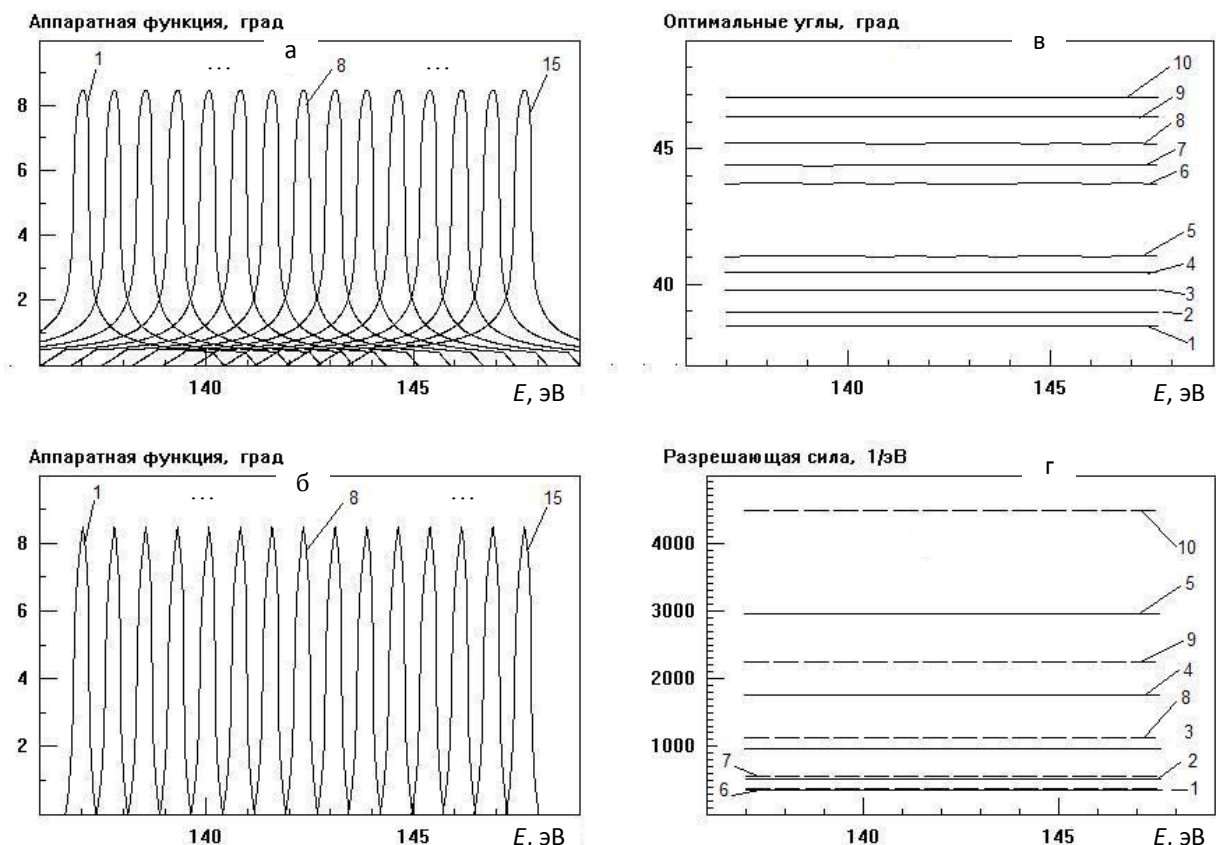


Рис. 5. Графики зависимостей при реализации фокусировки второго порядка (для разных напряжений на верхнем электроде — цифровая маркировка кривых). а — вид АФ при апертурных углах, больших оптимальных значений; б — вид АФ при апертурных углах, равных оптимальным значениям; в — зависимость оптимальных апертурных углов от энергии вершины пика АФ; г — зависимость разрешающей силы от энергии вершины пика АФ. Пояснения в тексте

В данном разделе представлены результаты изучения поведения перечисленных выше функций при реализации развертки по потенциалу для случая фокусировки второго порядка, а также в окрестности этого режима при изменении расстояния (положения ВД) в меньшую сторону. При этом (см. Ч1: рис. 1, б) режим работы спектрометра изменяется от режима фокусировки второго порядка к режиму "вблизи режима фокусировки второго порядка" ("квазифокусировка").

На ЦЗ подобраны такие параметры, что при потенциале на верхнем электроде -100 В реализуется фокусировка второго порядка. При получении результатов, представленных на рис. 5–7, использовалось изменение потенциала на верхнем электроде от -95 В до -105 В.

На рис. 5–7, а, б, представлены АФ при $L = L_{2f}$ и при величине зазора ВД 0.03 мм. Весь диапазон изменения напряжения на верхнем электроде разбит на 14 отрезков (15 значений напряжения). Для каждого из этих значений напряжения построены АФ (нормированная на равенство вершины пика АФ максимальной апертуре).

Для рис. 5–7, в, г, диапазон изменения напряжения на верхнем электроде разбивается на 100 частей (101 значение напряжения). Для каждого из этих значений напряжения построены значения оптимальных углов в зависимости от энергии вершины пика АФ и величина разрешающей способности в зависимости от энергии вершины пика АФ.

На рис. 5 представлены графики указанных выше зависимостей для случая, когда реализуется фокусировка второго порядка. Графики рис. 5, в, маркированные цифрами 1–5, соответствуют минимальным оптимальным углам апертуры и величинам зазора выходной диафрагмы 0.03 (1), 0.02 (2), 0.01 (3), 0.005 (4), 0.0025 мм (5). Графики 6–10 соответствуют максимальным оптимальным углам апертуры и величинам зазора выходной диафрагмы 0.0025 (6), 0.005 (7), 0.01 (8), 0.02 (9), 0.03 мм (10).

Графики рис. 5, г (1–5), построены при апертурных углах, больших оптимальных, и при величинах зазора выходной диафрагмы 0.03 (1), 0.02 (2), 0.01 (3), 0.005 (4), 0.0025 мм (5), а графики рис. 5, г (6–10), построены при апертурных углах, равных оптимальным, и при величинах зазора выходной диафрагмы 0.03 (6), 0.02 (7), 0.01 (8), 0.005 (9), 0.0025 мм (10).

При рассмотрении рис. 5, а и б, видно, что при варьировании ускоряющего напряжения (в пределах $\pm 5\%$) вид пика АФ практически не меняется, т. е. сам вид пика, его высота и ШНПВ не зависят от развертки по потенциалу верхнего электрода. При переходе от больших апертурных углов к оп-

тимальным (от рис. 5, а, к рис. 5, б), пик АФ становится более узким, вершина пика — более острой, а хвосты пика практически исчезают.

В рамках всего варьируемого промежутка потенциала верхнего электрода величины как больших, так и меньших оптимальных углов практически остаются постоянными для каждой величины ВД (рис. 5, в). Из этого следует, что при записи спектра с варьированием напряжения на верхнем электроде для выбранной величины ВД достаточно один раз для всего диапазона изменения напряжения выставить оптимальные углы апертуры.

Графики, приведенные на рис. 5, г, показывают, что разрешающая сила ЦЗ не меняется с изменением (в указанных выше рамках) напряжения на верхнем электроде. Этот факт значительно облегчает интерпретацию спектров, особенно по сравнению со случаем варьирования положения ВД.

При реализации режима фокусировки второго порядка важно знать, как изменится работа энергоанализатора при малых отклонениях некоторых параметров от оптимальных значений. Для этого исследовалась работа энергоанализатора при отклонении ВД от положения, при котором осуществляется фокусировка второго порядка, в сторону меньших значений.

На рис. 6–7 представлены такие же графики, как на рис. 5, но для случая, когда положение ВД ближе к источнику, чем при фокусировке второго порядка, на 0.5% (рис. 6) и на 1.0% (рис. 7).

При отклонении положения ВД от того положения, при котором реализуется фокусировка второго порядка, в сторону больших значений имеется ряд сложностей, связанных с соотношением условий реализации ситуаций, когда два пика сливаются в один и когда два пика разделены. Между этими ситуациями выполняется условие минимальности ширины пучка. Рассмотрение этой ситуации весьма трудоемко. Поэтому это рассмотрение будет проведено в следующей статье данной серии.

Сравнение графиков, представленных на рис. 5 и рис. 6–7, начнем с вида пика АФ при апертуре, большей оптимальной.

При варьировании напряжения на верхнем электроде и при приближении ВД к источнику изображение пика АФ (и высота пика, и его форма, и его ширина на полувысоте (ШНПВ)) практически не зависит от напряжения на верхнем электроде. Это подтверждается тем, что сплошные линии (внизу) на графиках рис. 5–7, г, являются прямыми линиями, параллельными оси X .

При рассмотрении пиков, полученных при установке оптимальных апертурных углов, имеем точно такую же ситуацию: вид пиков, их высота и ШНПВ не зависят от напряжения развертки (напряжения на внешнем электроде). Это проверено

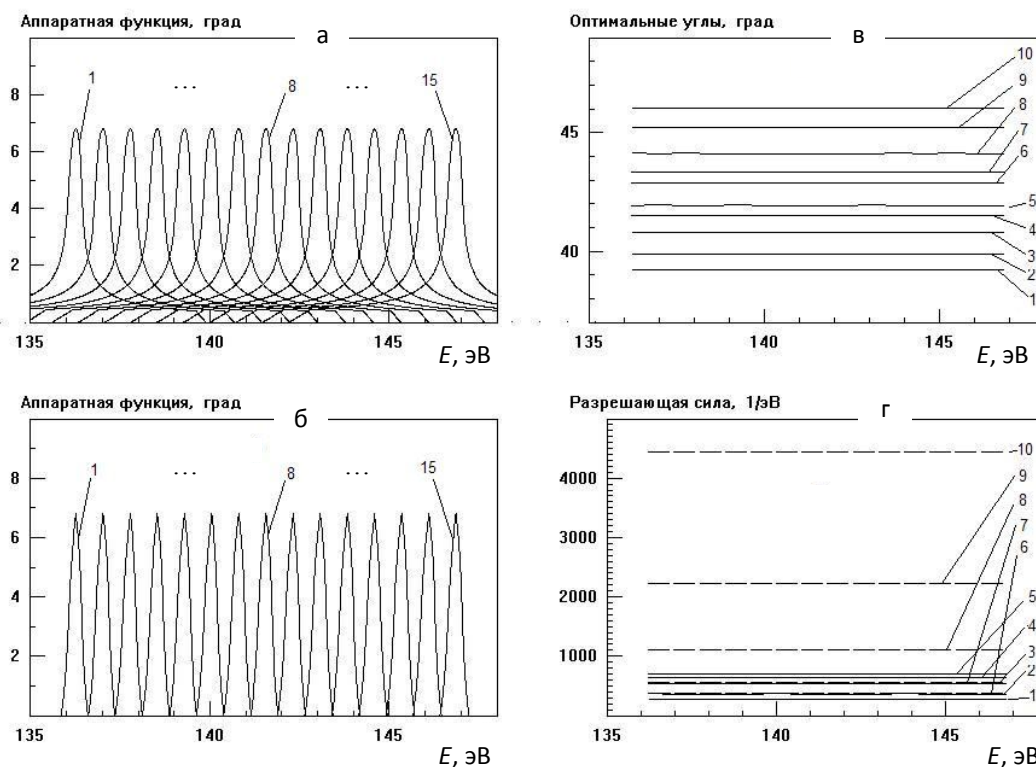


Рис. 6. Графики зависимостей для ЦЗ (то же, что на рис. 5) при уменьшенном расстоянии от источника до ВД на 0.5 %

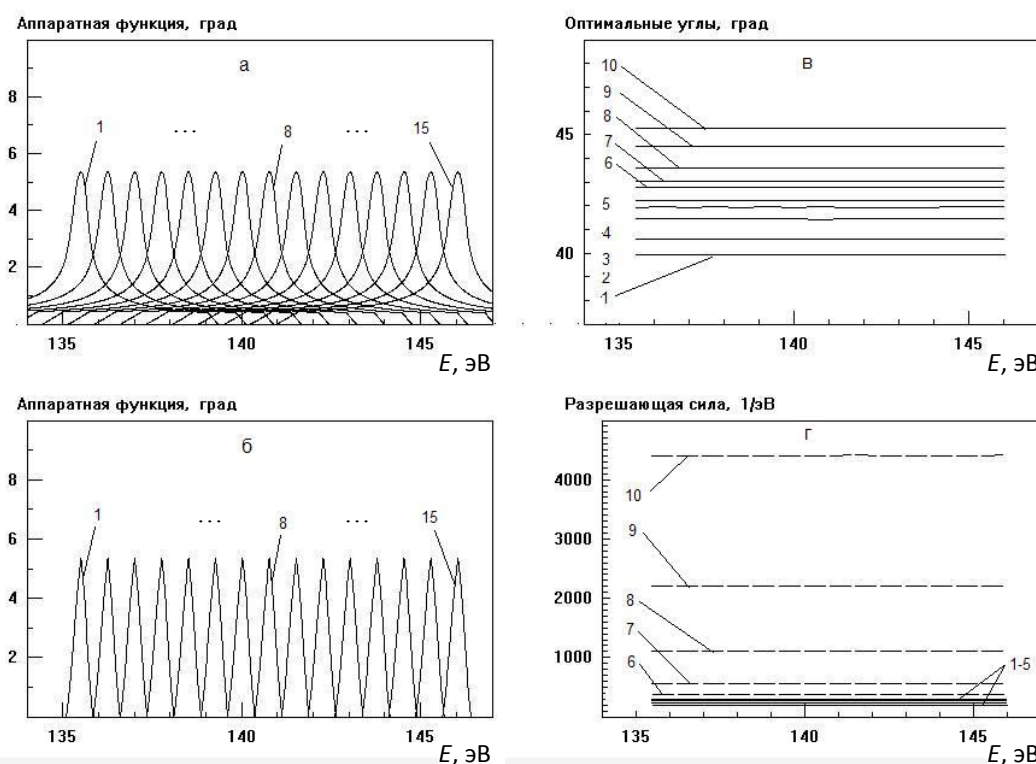


Рис. 7. Графики зависимостей для ЦЗ (то же, что на рис. 5) при уменьшенном расстоянии от источника до ВД на 1 %

при малых отклонениях этого напряжения от среднего значения.

Однако при столь малом сдвиге ВД по направлению к источнику электронов (0.5 % и 1 %) амплитуда пиков АФ уменьшается весьма заметно (от 8.3 к 6.4 и до 5.2 в градусах).

Графики зависимости оптимальных апертурных углов от величины напряжения на внешнем электроде (см. рис. 6, в, и 7, в) показывают с хорошей точностью независимость оптимальных апертурных углов от варьирования напряжения на внешнем электроде.

Графики зависимости разрешающей силы от величины напряжения на внешнем электроде (см. рис. 6, 7, г) показывают, что как в случае апертур, больших оптимальных (рис. 6, 7, г, кривые 1–5), так и в случае оптимальных значений апертурных углов (рис. 6, 7, г, кривые 6–10) значения разрешающей силы в рассматриваемом диапазоне напряжений на внешнем электроде не зависят от этого напряжения. При переходе от апертур, больших оптимальных, к оптимальным значениям величина разрешающей силы увеличивается до порядка. При значениях апертурных углов, больших оптимальных, при приближении к источнику наблюдается значительное падение разрешающей силы (до нескольких раз от значения, соответствующего фокусировке второго порядка). При оптимальных значениях апертурных углов при приближении ВД к источнику падение разрешающей силы не столь значительное (единицы–десятки процентов).

ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные выше результаты (рис. 1–4) дают нам ясный ответ на вопрос о возможности развертки по положению выходной диафрагмы (многодетекторный анализ или реализация электронного спектрографа). Для энергоанализатора типа ЦЗ и схемы ось—ось данный способ анализа электронного спектра имеет ряд особенностей, которые могут усложнить обработку получаемого спектра.

1. Мы не можем для всей совокупности ВД обеспечить оптимальные апертурные углы, поэтому для какой-то энергии пик АФ будет довольно узким, а для других энергий — не такой узкий и с довольно широкими хвостами.

2. Если апертурные углы не являются оптимальными, то разрешающая способность сильно зависит от энергии.

3. Величина пропускания сильно меняется с изменением энергии.

Конечно, если мы не выставляем оптимальные апертурные углы, то можно при обработке конечного спектра учесть вид АФ при каждой разрешаемой энергии и учесть изменение разрешающей способности от энергии. Однако это весьма трудоемкая и не очень точная обработка получаемого спектра.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало и для схемы ось—ось при развертке по положению выходной диафрагмы для каждого положения ВД — свои значения оптимальных углов, свои значения разрешения и пропускания (или своя АФ), что затрудняет точную обработку получаемого спектра.

С другой стороны, при развертке по потенциалу верхнего электрода оптимальные углы на входе пучка электронов в дисперсионное пространство (апертурные углы) и значения разрешения и пропускания практически постоянны вдоль всего диапазона изменения потенциала верхнего электрода. Что делает этот вид развертки более предпочтительным.

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. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы (Обзор) // ЖТФ. 1975. Т. 45, № 6. С. 1137–1169.
3. Козлов И.Г. Современные проблемы электронной спектроскопии. М.: Атомиздат, 1978. 248 с.
4. Холин Н.А., Шорина Т.А., Кубрик Д. От квазиконических энергоанализаторов к сфероидальным // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 2. С. 25–33.
5. Заиквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ. 1966. Т. 36, № 1. С. 132–137.

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

Контакты: Шевченко Сергей Иванович,
shevsi@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 14.12.2010.

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

S. I. Shevchenko

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

Two methods of development in the cylindrical power analyzer are considered: the development by position of a target diaphragm and the development on potential of the upper electrode. It is shown that development according to the position of a target diaphragm bears weight of difficulties with interpretation of spectra, and development on potential of the upper electrode with End Diaphragm, located in a point of performance of focusing of the second order, is easy to perform and to interpret the spectra.

Keywords: axial energy analyzer, apparatus function, resolving power, transmission