

УДК 537.533.3+ 621.319.7

© Н. А. Холин, Т. А. Шорина, Д. Кубрик

ОТ КВАЗИКОНИЧЕСКИХ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРОВ К СФЕРОИДАЛЬНЫМ

Статья посвящена дальнейшему прогрессу в области теоретического синтеза и практического воплощения электростатических энергоанализаторов с рекордными параметрами по светосиле и разрешению. В основу поиска оптимальных решений положена компьютерная стратегия, использующая самые современные пакеты программ, в частности SIMION. В данном случае речь идет о глубокой плавной деформации квазиконических систем с целью улучшения технологичности конструкции и повышения энергоанализирующих характеристик.

Кл. сл.: светосильный электростатический энергоанализатор заряженных частиц, сфероидальный энергоанализатор, компьютерное моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Введение квазиконических систем с осесимметричным гармоническим потенциалом вида $\varphi = M(r) + N(z)$ оказалось очень удачным способом сильной деформации цилиндрического зеркала, приводящим к качественному скачку его энергоанализирующих свойств как по уровню фокусировки, так и по величине дисперсии. Однако в данный момент мы можем признать, что все эти улучшения уже исчерпаны и нужны новые идеологические подходы. С математической точки зрения наиболее логичный путь состоит в плавной деформации квазиконических потенциалов с помощью дополнительных членов, а именно надо положить

$$\varphi = \ln r - \frac{r^2}{2} + z + \Omega(r, z),$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} = 0.$$

Гармоническая функция $\Omega(r, z)$ не должна доминировать над основной структурой по крайней мере на первых порах. Можно было бы написать

$$\Omega(r, z) = k\sigma(r, z),$$

где k — малый параметр, а σ — любое осесимметричное решение уравнения Лапласа, не имеющее особенностей в рабочей области квазиконического энергоанализатора с оптимальными параметрами. Здесь, конечно, мы встаем в тупик. Что взять в качестве σ в первую очередь? Возможностей бесконечно много, логических предпочтений никаких. Если бы мы стояли исключительно на аналитической точке зрения, то разумно взять в

качестве σ гармонические полиномы по r, z четного порядка со степенями 4, 6, 8 и так далее. Теоретически стандартные методы малого параметра вполне могли бы здесь помочь, но сложность аналитических построений почти необозрима.

Способом неявного введения члена $\sigma(r, z)$, о точной форме которого мы, может быть, ничего не знаем, является небольшая деформация электродов квазиконической системы в направлении, желательном для технологии. Наш предыдущий вычислительный опыт показывает, что переход от идеальной квазиконической системы бесконечной длины по z к обрезанному варианту с завернутыми краями электродов, несмотря на значительную деструкцию идеального поля, позволяет получить практически те же электронно-оптические характеристики без какого-либо ухудшения. Это обстоятельство указывает на сильную устойчивость данного класса полей и внушает нам мысль двигаться по пути деформации электродов более уверенно. Программа (пакет программ) SIMION оказался в этом смысле прекрасным инструментом такой плавной перестройки как формы электродов, так и выбора режима ввода-вывода электронов.

ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР, ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ КОТОРОГО ОПИСЫВАЮТСЯ ПОЛИНОМАМИ

Первая попытка, которая, конечно, была связана с кропотливым трудом, заключалась в замене квазиконических электродов поверхностями вращения, меридиональный профиль которых выражался алгебраически с помощью полиномов. Серия численных экспериментов позволила сделать внешний и внутренний электроды более плавными

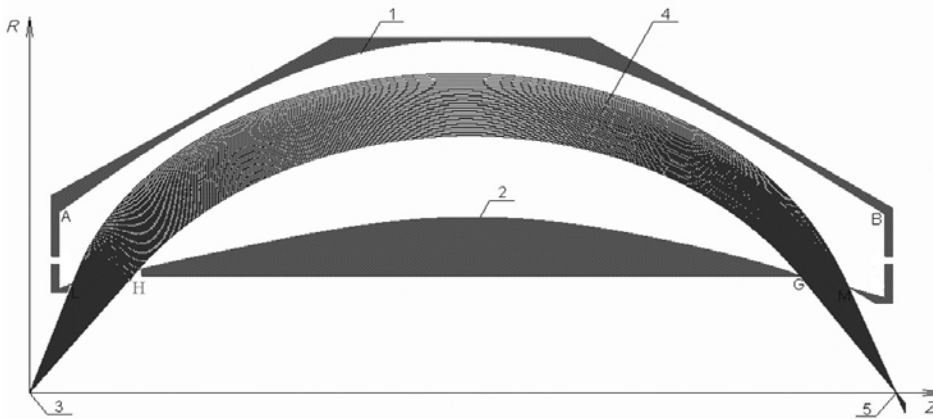


Рис. 1. Электронно-оптическая схема аксиально-симметричного энергоанализатора, эквипотенциальные поверхности которого описываются полиномиальными уравнениями, приведенными в тексте.

1 — внешний электрод (кривая АВ) анализатора; 2 — внутренний электрод (кривая HG) анализатора; 3 — местоположение образца; 4 — траектории движения заряженных частиц; 5 — выходной фокус анализатора

по сравнению с квазиконическими и более компактными [1].

Поверхности внешнего и внутреннего электродов такого энергоанализатора (рис. 1) описываются в цилиндрической системе координат уравнениями:

$$R = K \left\{ [1.081686 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-7} \cdot Z^4 - [3.9129499 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-5} \cdot Z^3 - [4.2226163 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-4} \cdot Z^2 + [0.7764979 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot Z + [37.2344916 \cdot (1 \pm \Delta)] \right\}$$

(рис. 1, кривая АВ)

и

$$R = K \cdot \left\{ [-6.2172034 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-14} \cdot Z^7 + [1.6187509 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-11} \cdot Z^6 + [3.0763282 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-9} \cdot Z^5 - [1.4578343 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-6} \cdot Z^4 + [1.7090891 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-4} \cdot Z^3 - [0.92083553 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot 10^{-2} \cdot Z^2 + [0.462323 \cdot (1 \pm \Delta)] \cdot Z + [20.9643972 \cdot (1 \pm \Delta)] \right\}$$

(рис. 1, кривая HG),

где R — расстояние от оси вращения Z ; Z — координата по оси вращения; за начало отсчета $(0, 0)$ принято положение источника анализируемых заряженных частиц; K — масштабный коэффициент, определяющий размеры анализатора; Δ — допуск на точность изготовления электродов.

Расчеты и моделирование показали возможность достижения разрешения лучше 0.05 % на полувысоте спектральных линий при светосиле до 30 % от 2π .

СФЕРОИДАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР

Следующий шаг привел к очень элегантному многообещающему универсальному решению, представленному в статье [2] и патенте [3].

Внешний (2) и внутренний (3) электроды сфероидального анализатора (рис. 2) представляют собой концентрические сфероидальные поверхности, формируемые путем вращения дуг двух неконцентрических окружностей, имеющих различные радиусы, вокруг одной и той же секущей прямой. Размеры анализатора определяются следующими соотношениями. Радиус R_1 дуги, образующей внешний электрод, превышает максимальный радиус R_{01} внешнего электрода, измеренного в меридиональной плоскости симметрии анализатора, в K_1 раз, а радиус R_2 дуги, формирующей внутренний электрод, превышает максимальный радиус R_{02} внутреннего электрода анализатора в K_2 раз в той же плоскости симметрии анализатора. Расстояние между этими двумя упомянутыми электродами в их максимуме равно $R_{01} - R_{02} = (K_2 R_1 - K_1 R_2) / K_1 K_2$.

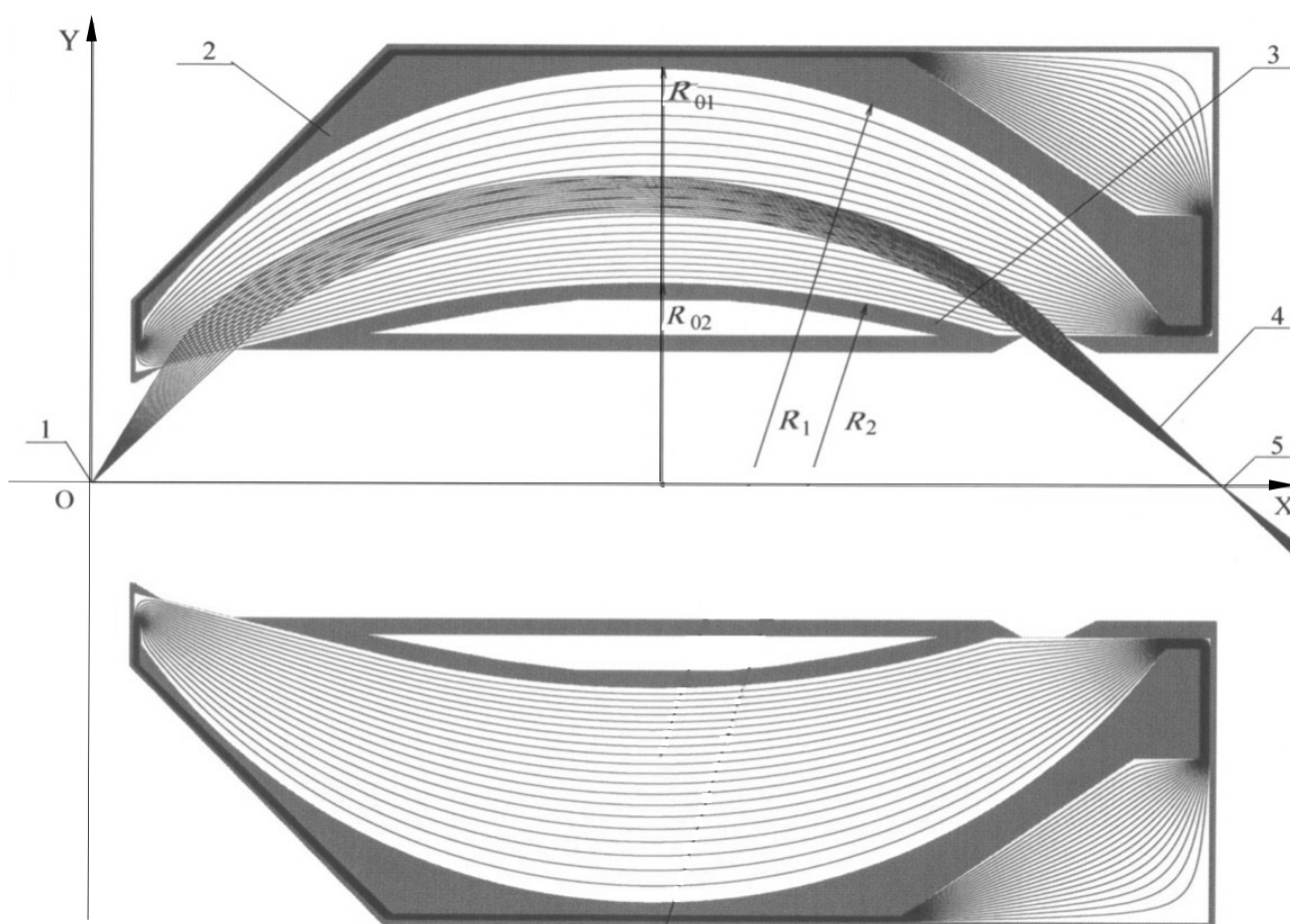


Рис. 2. Электронно-оптическая схема сфероидального энергоанализатора SEA 124-220-45. 1 — местоположения образца; 2 — внешний электрод анализатора (радиус R_1); 3 — внутренний электрод анализатора (радиус R_2); 4 — траектории движения заряженных частиц; 5 — выходной фокус анализатора; R_{01}, R_{02} — максимальные расстояния внешнего и внутреннего электродов от оси симметрии X энергоанализатора

Величины K_1 и K_2 в этом простом выражении имеют большое значение, т. к. они определяют, по существу, типы анализаторов: полусферический классический анализатор (Hemi Spherical Analyzer, HSA) — при минимальной величине этих коэффициентов $K_1 = K_2 = 1$; цилиндрический анализатор (Cylindrical Mirror Analyzer, CMA) — при их максимальном значении $K_1 = K_2 \leq \infty$; а также новый (неизвестный до сих пор) сфероидальный энергоанализатор (Spheroid Energy Analyzer, SEA) при $\infty > K_1, K_2 > 1$.

Так что электронная оптика сфероидального энергоанализатора является обобщающей оптикой, из которой вытекают классические электронно-оптические системы HSA и CMA. Следовательно, она должна или по крайней мере может обладать их лучшими характеристиками. И действительно, разрешение нового анализатора $\Delta E / E < (0.0025-0.05) \%$ по основанию спектральных линий и при светосиле не менее (7.5–30) % от полу-

сферы может легко обеспечиваться во множестве вариантов сфероидальных анализаторов. В случае использования классических анализаторов это абсолютно недостижимо.

На рис. П1 (в Приложении) представлена входная часть анализатора. Расходимость пучка заряженных частиц в данном случае ограничена углами (44–60)°, что соответствует светосиле (телесному углу) 22 % от полусферы. Следует обратить внимание на отсутствие корректирующих элементов во входной части анализатора. Здесь формирование полевой структуры анализатора удачно завершается путем использования геометрии торцевой части анализатора без введения потенциально отличающихся корректирующих электродов.

На рис. П2 показана выходная часть анализатора с траекториями трех пучков частиц, различающихся между собой по энергии на 0.05 % по основанию спектральных линий. Угловая расходимость частиц в выходной области анализатора

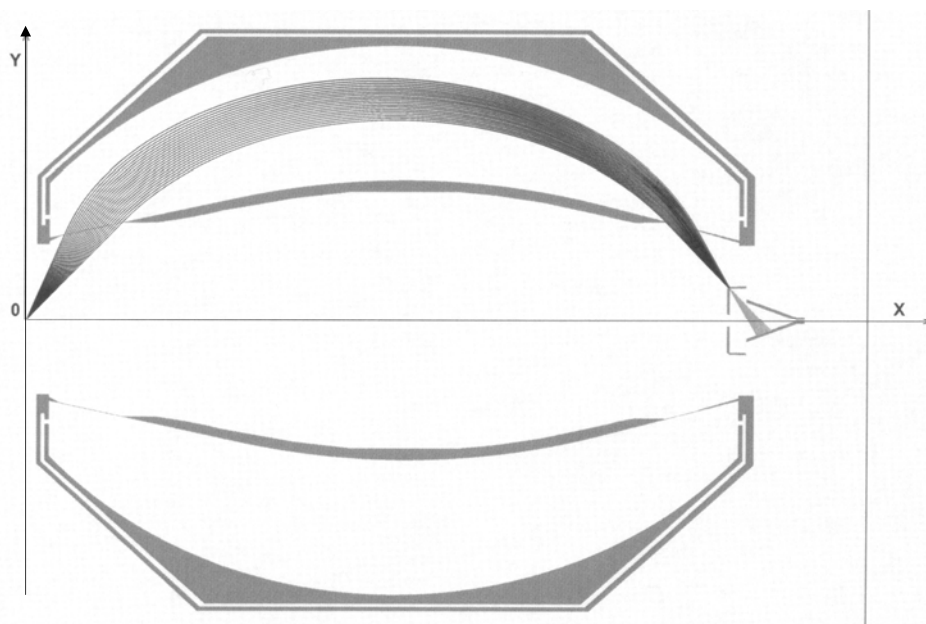


Рис. 3. Пример фокусировки "ось—кольцо" в анализаторе сфероидального типа

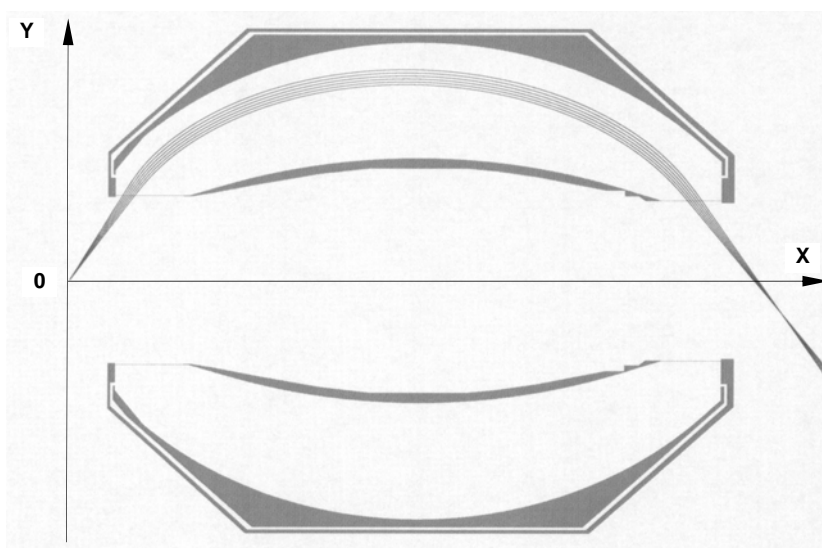


Рис. 4. Пример электронно-оптической системы, обеспечивающей сверхвысокое разрешение

равна 7° (от 38 до 45°). При этом кроссовер в выходном фокусе анализатора не превосходит 20 мкм при огромной глубине резкости (рис. П3). Это гарантирует высокое качество записи спектральных линий при не критичных требованиях к положению детектирующей системы.

Выходная полевая структура анализатора наиболее естественно согласуется с основной структурой анализатора путем использования протяженной цилиндрической части внутреннего элек-

трода анализатора с кольцевой щелью, предусмотренной для вывода частиц из полевого пространства. При этом в случае увеличения ширины кольцевой щели анализатора открывается возможность одновременного детектирования большого количества разделенных пучков. Этому содействует большая глубина и высокое качество фокусировки заряженных частиц и малый уход кроссовера с оси анализатора (рис. П4).

Следует отметить, что в принципе уход кроссо-

вера с оси анализатора может быть по крайней мере минимизирован. Однако в простейшем случае протяженного (вдоль оси анализатора) детектора прием сигнала возможен лишь с полусферы анализатора (как в классическом полусферическом анализаторе). В этом варианте работы возможен многодетекторный прием сигнала, вплоть до реализации электронного спектрографа широкого диапазона энергий разделяемых пучков заряженных частиц.

Интерес представляет также анализатор со сфероидальной полевой структурой, в котором реализуется режим фокусировки "ось—кольцо" (рис. 3). В этом варианте также легко реализуется разрешение 0.05 % при светосиле не мене 30 % от полусферы. На рис. 3 показан общий вид электронно-оптической системы с фокусировкой "ось—кольцо", а на рис. П5 демонстрируются три пучка заряженных частиц, различающиеся между собой по энергии на 0.05 % по их основанию. Это разрешение отнюдь не является предельным разрешением этой полевой структуры.

Например, на рис. 4 показана электронно-оптическая система со сфероидальной полевой структурой сверхвысокого разрешения. На рис. П6 демонстрируется характер поведения трех траекторий заряженных частиц в области фокальной кольцевой области электронно-оптической схемы, приведенной на рис. 4. Энергии заряженных частиц каждого из пучков различаются на 0.0026 % по их основанию. В каждом из моноэнергетических пучков 500 траекторий в угле их входа в анализатор (57–62)° с дискретностью 0.01°. Как видно, глубина резкости в выходном фокусе анализатора также огромна при высоком качестве фокусировки, что гарантирует высокую чистоту регистрации спектральных линий при экстремально высоком разрешении. Любая из упомянутых выше электронно-оптических систем существенно превосходит по своим параметрам известные анализаторы.

Таким образом, поиск высокоэффективных полевых структур, расчет и моделирование на их основе электронно-оптических систем анализаторов показали, что энергетическое разрешение $\Delta E / E$ в диапазоне (0.0025–0.05) % по основанию спектральных линий и при светосиле по крайней мере 7.5–30 % от полусферы легко обеспечивается во множестве вариантов наиболее интересных анализаторов сфероидального типа. Уникальная простота этих энергоанализаторов и их выдающиеся дисперсионные и фокусирующие возможности открывают дорогу для создания ЭМХА.

На рис. П7 показано фото первого экспериментального образца сфероидального анализатора, разработанного в Лаборатории электронной спектроскопии Института аналитического приборостроения РАН и изготовленного совместно с фирмой Shimadzu (Япония).

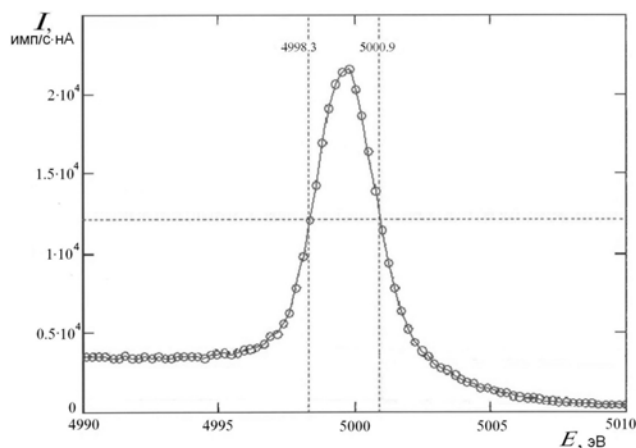


Рис. 5. Пик упругоотраженных электронов, разрешение 0.048 %

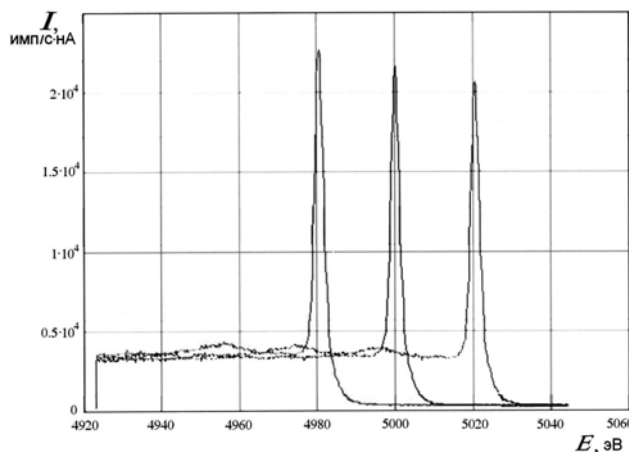


Рис. 6. Пики упругоотраженных электронов при различных энергиях первичного электронного пучка (4980, 5000, 5020 эВ). Разрешение 0.046 %; материал образца — нержавеющая сталь

Первые же экспериментальные результаты подтвердили теоретические и расчетные данные. На рис. 5 приведен пример разрешения энергоанализатора по пику упругоотраженных электронов от поверхности нержавеющей стали. На рис. 6 приведен пример разделения трех энергетических линий, различающихся между собой менее чем на 0.05 % при светосиле анализатора 22 %.

На рис. 7 приведен спектр упругоотраженных электронов и характеристических потерь, полученных от германиевого образца и записанных при разрешении около 0.05 % по полувысоте спектральных линий. Обращает на себя внимание ярко

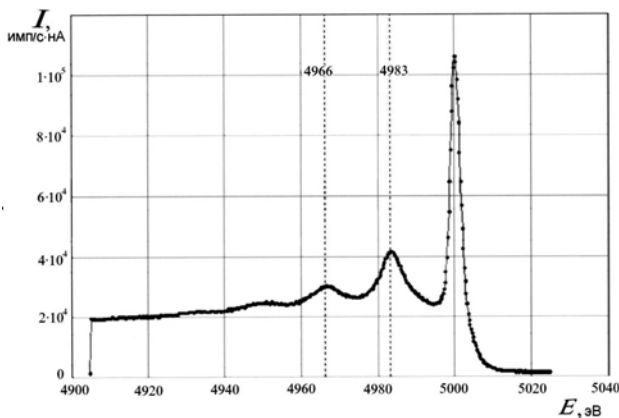


Рис. 7. Электронный спектр упругоотраженных электронов и характеристических потерь в образце германия. Разрешение анализатора 0.048 % по полувысоте

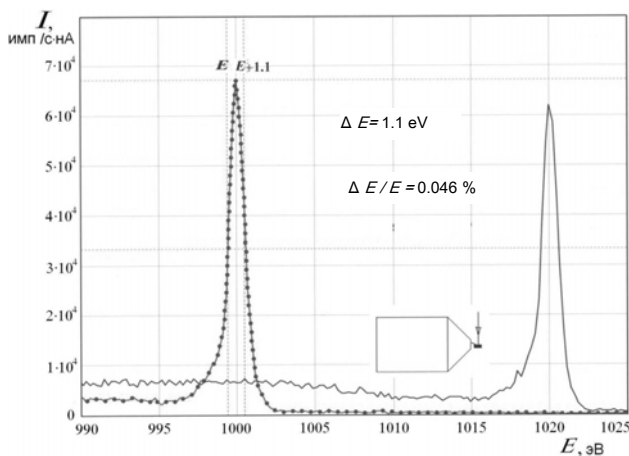


Рис. 8. Электронный спектр упругоотраженных электронов и характеристических потерь в образце германия. Разрешение анализатора 0.048 % по полувысоте

выраженные спектральные линии характеристических потерь. Также четко они проявляются на других образцах, но это сглаживается при записи из-за большого соотношения линий упруго-отраженных электронов и характеристических потерь. Все спектры записаны при очень малых интенсивностях первичных электронных пучков (не более десятых долей наноампер) для исключения перегрузки умножителей. (В анализаторе использовался умножитель Amtektron MD-502).

На рис. 8 показан спектр упругоотраженных электронов меньших энергий по сравнению со спектрами вышеприведенных рисунков. Здесь же схематически показано, что запись проведена в режиме полусферического анализатора. Лишь

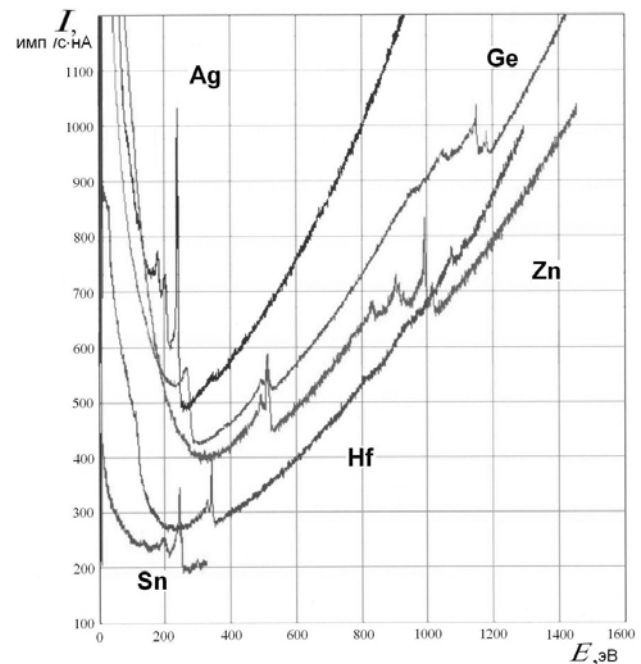


Рис. 9. Спектры Оже-электронов различных материалов (Sn, Hf, Zn, Ge, Ag)

верхняя половина анализатора "видит" поверхность образца, совмещенную с оптической осью анализатора и облучаемую вертикально внешним электронным пучком. В соответствии с рис. П4 в этом случае может легко реализоваться вариант многодетекторной спектроскопии.

Рис. 9 демонстрирует Оже-электронные спектры различных материалов. Высокая светосила анализатора позволяет работать на очень малых интенсивностях первичных пучков (долях и единицах наноампер).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оставляя пока незатронутыми многие интересные теоретические и практические инструментальные вопросы будущих возможных областей применения найденных электронно-оптических систем, можно констатировать следующее.

- Разработаны и запатентованы электростатические анализаторы аксиальной симметрии высокого разрешения и светосилы, на основе которых экспериментально апробирована первая модель электронного микроскопа для химического анализа (ЭМХА). Характерными особенностями этого ЭМХА являются уникальная простота электронно-оптической системы и эффективность ее использования для микро- и наноисследований.

- Созданная система пригодна для одно- и многоканальной спектроскопии и микроскопии.

- Она может стать основой электронной спектрографии.
- Совершенно очевидна перспективность дальнейшего исследования рассмотренных поле-

вых структур и их применения в новых высокоэффективных инструментах диагностики веществ на атомно-молекулярном уровне.

ПРИЛОЖЕНИЕ

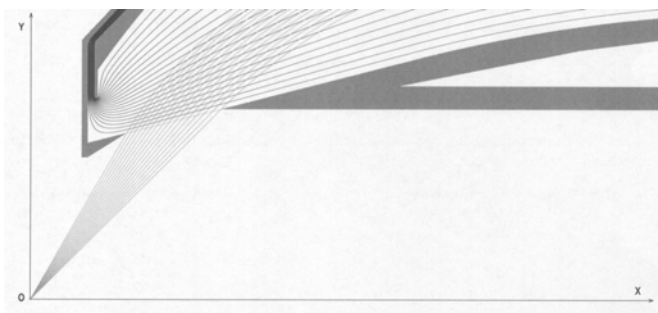


Рис. П1. Входная часть электронно-оптической системы анализатора



Рис. П2. Выходная часть электронно-оптической системы анализатора

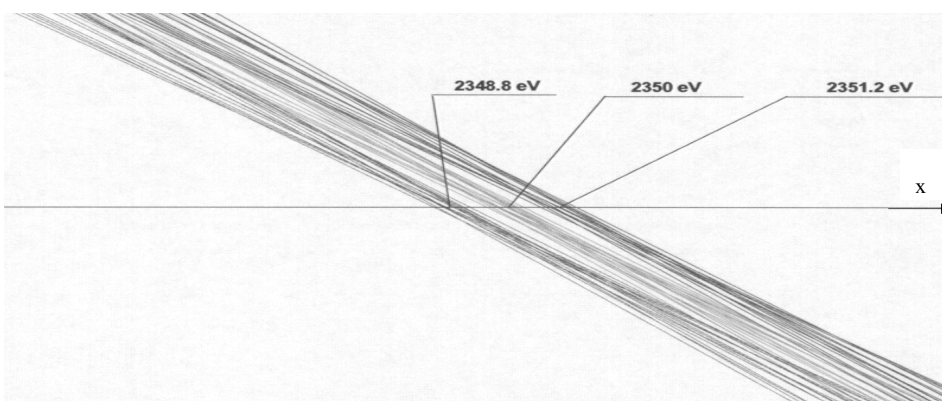


Рис. П3. Характерный вид траекторий заряженных частиц в выходной фокальной области анализатора

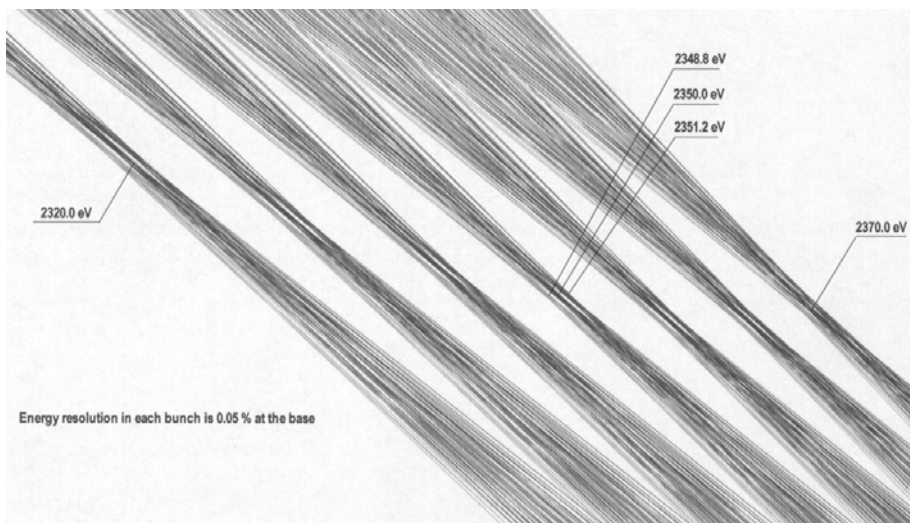


Рис. П4. Пример множественных траекторий в выходной области анализатора

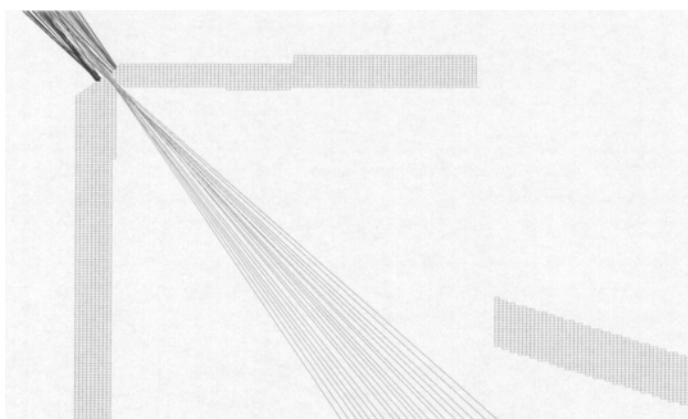


Рис. П5. Пример разделения трех пучков заряженных частиц, различающихся между собой по энергии на 0.05 % (по их основанию)

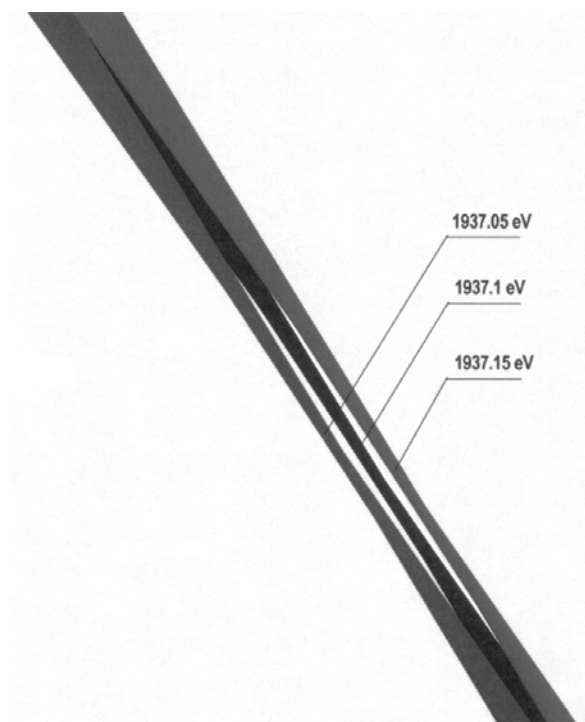


Рис. П6. Характерный вид траекторий заряженных частиц в фокальном кольце электронно-оптической схемы, показанной на рис. 4



Рис. П7. Фото внешнего и внутреннего электродов анализатора сферического типа SEA 124-220-45. Здесь же видна электронная пушка, встроенная во внутренний электрод анализатора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холин Н., Зигбан К., Симуткин В. Анализатор энергий заряженных частиц. Патент RU № 2294579, 27.02.2007.
2. Cubric D., De Fanis A., Kholine N., Konishi I. Design and Applications of Novel Charged Particle Energy Analysers // Тезисы докладов на международной конференции "Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation", July 14–18, 2008, Brno, Czech Republic.
3. Kholine N., Cubric D., Konishi I. Анализатор энергии заряженных частиц. Патент GB № 0720901.8, 24.10.2007.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Холин Н.А., Шорина Т.А.)

Исследовательская лаборатория Shimadzu, Манчестер, Великобритания (Кубрик Д.)

Материал поступил в редакцию 14.04.2009.

FROM QUASI-CONICAL ENERGY ANALYZERS TO SPHEROID ONES

N. A. Kholine¹, T. A. Shorina¹, D. Cubric²

¹*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*
²*Shimadzu Research Laboratory, Manchester, UK*

The article is devoted to further progress in the field of theoretical synthesis and practical embodiment of electrostatic energy analyzers with record entrance acceptance solid angles and energy resolution. The basis of these optimal solutions search is computer strategy using the most modern programs, in particular SIMION Version 8. In this case the question is of deep smooth deformation of quasi-conical systems with the purpose to increase energy analyzing properties and to improve technology of construction manufacture.

Keywords: high acceptance electrostatic energy analyzer of charged particles, spheroid energy analyzer, computer modeling