

# Электронные и ионные пучки

УДК 621.384

## Высокодисперсионные энергоанализирующие электрические поля

Ю. К. Голиков, Н. К. Краснова, И. А. Марциновский

*Представлены варианты конструкций энергоанализаторов, обладающих острой фокусировкой по углу влета и высокой энергетической дисперсией. Двухмерные и трансаксиальные полевые конфигурации, реализующие такие свойства, получены на основе теории обратных задач аналитическими методами. Помимо конкретных реализаций сформулированы идеи для конструирования новых систем с очень высокими электронно-оптическими характеристиками.*

PACS: 29.30.Dn, 07.81.+a

*Ключевые слова:* электронная спектроскопия, электростатические энергоанализаторы, обратные задачи аналитической механики, энергетическое разрешение.

### Введение

Приборы с рекордными характеристиками для современного энергоанализа, по-прежнему, весьма актуальны. Такие приборы позволяют повысить помимо разрешения фиксируемых спектров также и чувствительность используемых методов электронной и ионной спектроскопии. Существующие энергоанализирующие системы большей частью традиционных геометрий, имеющие форму задающих электродов — плоскую, цилиндрическую или сферическую, изучены достаточно подробно, поэтому ожидать от этих систем высоких электронно-оптических параметров трудно. Например, в таких системах, как сферический дефлектор, цилиндрическое зеркало, тороидальный анализатор и ряд других, энергетическая дисперсия в условиях фокусировки примерно равна базе прибора, т. е. расстоянию между образцом и детектором. Таким образом, чтобы получить энергоанализатор высокого разрешения, нужен другой подход к выбору полей, разделяющих потоки анализируемых частиц.

В основе синтеза предлагаемых в статье электростатических полей, обладающих отличными фокусирующими свойствами и высокой дисперсией, лежит аналитический подход и решение обрат-

ных задач. Такой метод, когда ищется поле, характеризующееся нужными авторам свойствами, заранее сформулированными (например, определенной формой фокусировки), был разработан Ю. К. Голиковым и успешно применен ранее. В частности, энергоанализатор "Тутанхамон" [1—5] является иллюстрацией такого аналитического подхода. Поле, создаваемое между криволинейными электродами анализатора, обладает идеальной фокусировкой потока заряженных частиц в плоскости симметрии, сочетающейся с высокой энергетической дисперсией, в десятки раз превышающей стандартные традиционные приборы энергоанализа.

Применяя методы, разработанные авторами в теории обратных задач, можем построить ряд двухмерных и трансаксиальных энергоанализаторов, совмещающих высокое качество фокусировки и огромную дисперсию. Проведенная оценка показала, что особенно выгодными являются электростатические конфигурации с экспоненциальным падением потенциала в пространстве, их и рассмотрим подробнее в данной статье.

### Энергоанализатор "Арка"

Сформулируем следующую задачу: пусть в тормозящее поле, действующее вдоль оси  $x$ , из начала координат влетает веер частиц с фиксированной энергией. Если через  $P$  обозначить точку возврата частицы на ось  $z$ , то пусть положение  $P$  для каждой частицы будет пропорционально углу влета  $P = k\theta$ . Оказалось, что потенциал поля, обеспечивающий такой тип движения анализируемых частиц, имеет экспоненциальный характер. При выбранном законе изменения смещения  $P$  в самом

Голиков Юрий Константинович, профессор.  
Краснова Надежда Константиновна, доцент.  
Марциновский Иван Артемьевич, аспирант.  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.  
Россия, 195251, С.-Петербург, ул. Политехническая, 29.  
E-mail: n.k.krasnova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2010 г.

© Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Марциновский И. А., 2012

поле фокусировки нет, однако если вынести источник и детектор за пределы поля, то в плоскости  $(x, z)$  можно получить фокусировку II порядка. Теперь исследуем подробно это двухмерное экспоненциальное поле, потенциал которого запишется в виде

$$\varphi(x, y) = 1 - e^{-2\pi x} \cos 2\pi y. \quad (1)$$

Особым свойством этого поля является то, что все эквипотенциали, кроме  $\varphi = 1$ , имеют совершенно одинаковую форму и отличаются только положением на плоскости  $(x, z)$  (рис. 1). Эквипотенциали  $\varphi = 1$  вырождаются в периодическую систему прямых линий, параллельных оси  $x$  и отстоящих друг от друга на расстояние, равное  $1/2$ . Поскольку профиль эквипотенциали здесь очень похож на классическую арку, то и анализаторы, построенные из таких профилей, удобно называть "Аркой". Все дальнейшее исследование проведено в рамках безразмерной модели за счет выбора характерных параметров:  $\lambda$  — длины или базы (в мм),  $\Phi_0$  — потенциала (в вольтах),  $T$  — времени (в секундах), связанных друг с другом следующим соотношением

$$\frac{m\lambda^2}{T^2} = q\Phi_0.$$

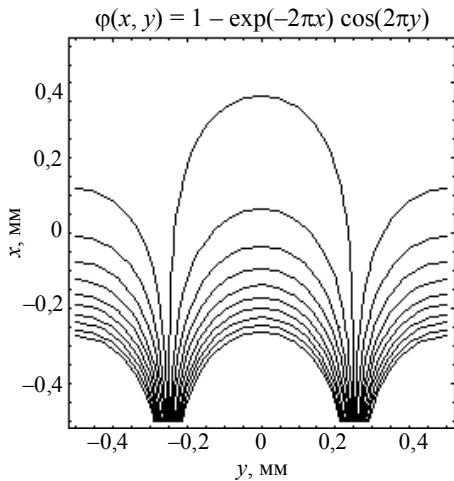


Рис. 1. Эквипотенциальный портрет поля в энергоанализаторе "Арка"

Изучим движение в плоскости симметрии  $y = 0$  при следующих стартовых условиях

$$\begin{cases} x_0 = y_0 = z_0 = 0 \\ \dot{x}_0 = \sqrt{2W} \sin \theta, \dot{y}_0 = 0, \dot{z}_0 = \sqrt{2W} \cos \theta \end{cases}$$

где  $W = \frac{\dot{x}_0^2 + \dot{z}_0^2}{2}$  — начальная энергия частицы.

Вдоль  $z$  имеет место дрейф

$$z = \sqrt{2W} \cos \theta \cdot \tau.$$

Движение по  $x$  можно определить, если написать интеграл энергии

$$\frac{\dot{x}^2}{2} + 1 - e^{-2\pi x} = A,$$

где  $A = \frac{\dot{x}_0^2}{2} = W \sin^2 \theta$ .

Тогда

$$x = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \frac{\sin \left\{ \pi \sqrt{2(1-A)} \tau + \arcsin \sqrt{1-A} \right\}}{\sqrt{1-A}}. \quad (2)$$

Вершина траектории  $x_m$  получается из (2) при  $\dot{x} = 0$

$$x_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1-A}}. \quad (3)$$

Частица достигает вершины в момент  $\tau_m = \frac{\arcsin \sqrt{A}}{\pi \sqrt{2(1-A)}}$  и, следовательно, точка прилета на ось  $z$

$$P = \frac{2\sqrt{W} \cos \theta \cdot \arcsin(\sqrt{W} \sin \theta)}{\pi \sqrt{1 - W \sin^2 \theta}}$$

или при начальной энергии частицы  $W = 1$

$$P|_{W=1} = \frac{2}{\pi} \theta. \quad (4)$$

Высчитаем величину энергетической дисперсии  $D$  при этой энергии  $W = 1$

$$D|_{W=1} = W \frac{dP}{dW} \Big|_{W=1} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\theta}{\cos^2 \theta} + \text{tg} \theta \right).$$

Отнесем ее к базе траектории (4), тогда

$$\frac{D}{P} \Big|_{W=1} = \frac{1}{2 \cos^2 \theta} + \frac{\text{tg} \theta}{\theta}.$$

Из рис. 2 видно, что дисперсия в "Арке" в области больших углов  $\theta$  выше, чем дисперсия в энергоанализаторе "Туганхамон".

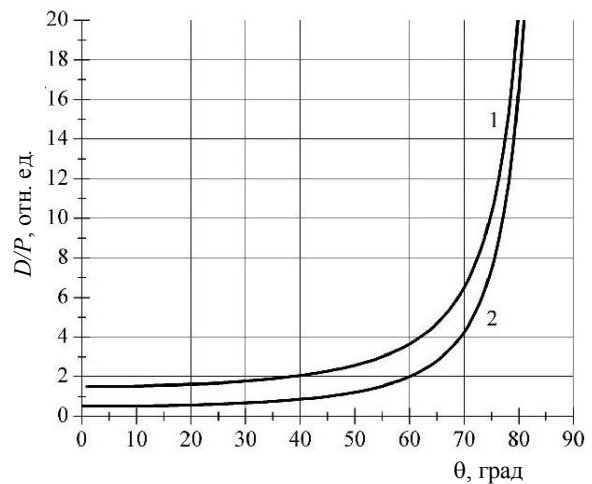


Рис. 2. Энергетическая дисперсия, отнесенная к базе  $P$ . Кривая 1 — в анализаторе "Арка" и кривая 2 — "Туганхамон"

Оценим габаритные размеры нашего энергоанализатора. Если выбрать энергию настройки, равной  $W = 1$ , то высота подъема траектории (3) запишется формулой

$$x_m|_{W=1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{1}{\cos \theta}.$$

При  $\theta \rightarrow \pi/2$  вершина  $x_m \rightarrow \infty$ , однако очень медленно. Например, при  $\theta = 89,9^\circ$  имеем  $x_m = 1,01$ , т. е. вершина практически равна базе системы вдоль  $z$ . Ход траекторий в плоскости симметрии  $y = 0$  (рис. 3) при  $W = 1$  выражается более простой формулой, чем (3)

$$x = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \frac{\cos(\sqrt{2}\pi \cos \theta \cdot \tau - \theta)}{\cos \theta}.$$

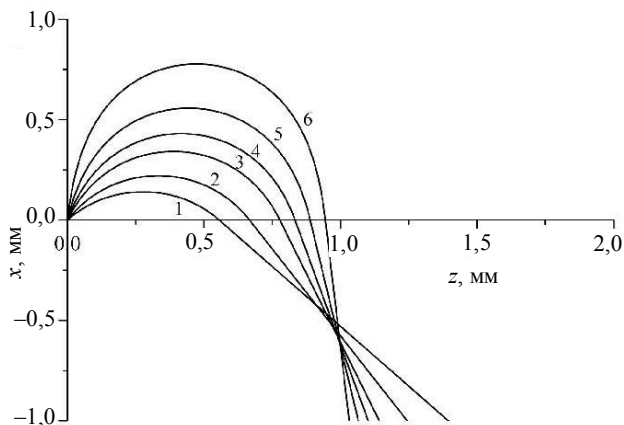


Рис. 3. Ансамбль траекторий в анализаторе "Арка" при  $W = 1$  и различных начальных углах  $\theta$ : 1 —  $50^\circ$ ; 2 —  $60^\circ$ ; 3 —  $70^\circ$ ; 4 —  $75^\circ$ ; 5 —  $80^\circ$ ; 6 —  $85^\circ$

Рис. 3 иллюстрирует движение в экспоненциальном поле (1), а именно, веерный пучок фокусируется. В области малых и умеренных углов  $\theta < 70^\circ$  фокусировка просто плохая, но в области  $\theta > 70^\circ$  она становится все более похожей на идеальную, и это происходит как раз в области очень больших дисперсий (см. рис. 2).

Поле "Арки" обладает достаточно сильным поперечным фокусирующим действием и при небольшом угловом разбросе относительно оси  $x$  в электронном пучке можно получить абберационное размытие приемлемо малых размеров.

Таким образом, габариты анализатора составляют (1, 1/2, 1) в долях базы прибора  $\lambda$ . Разрешающая способность энергоанализатора "Арка" примерно такая же, как и у "Тутанхамона", но зато он имеет несомненные технические преимущества. Во-первых, по направлению  $y$  он ровно вдвое уже, во-вторых, форма электродов проще, и, в-третьих, он допускает вынос источника анализируемых частиц и приемника в дрейфовое пространство.

Данный прибор был построен и испытан в институте металлофизики Академии наук Украины;

он показал при малых размерах ( $\lambda = 60$  мм) разрешение порядка 0,03 % [6].

Исключительно высокая дисперсия "Арки" и возможность вплотную приблизиться к углам ввода почти  $90^\circ$  позволяет нам рекомендовать особый режим ввода электронов в виде параллельного пучка. В этом случае при  $\theta \cong 89,5^\circ$  и диаметре параллельного пучка  $\cong 1$  мм можно иметь разрешение  $\frac{\Delta E}{E} \approx 0,02$  %, если база прибора  $\lambda = 100$  мм.

С точки зрения упрощения профиля электродов, здесь оказывается вполне возможным делать "Арку" в виде двух параллельных пластин, сопряженных круговым полуцилиндром.

### Энергоанализатор "Рыбий глаз"

Трансаксиальные поля можно рассматривать как ближайшее обобщение двумерных полей с плоскостью симметрии. Их потенциалы  $\varphi(r, z)$  обладают осевой симметрией и, следовательно, подчиняются осесимметричному уравнению Лапласа в цилиндрической системе координат. Отличительным признаком трансаксиальных систем является наличие дополнительной плоскости симметрии  $z = 0$ , являющейся носителем оптических каркасов и возле которой стелется весь анализируемый поток. Изучая движение частиц в этой плоскости, можно построить формулы, родственные по смыслу варианту планарных полей, позволяющие строить потенциалы по характеристикам фокусирующего и дисперсионного действия.

В данном исследовании авторы вывели однопараметрическое семейство трансаксиальных систем с идеальной фокусировкой в плоскости симметрии  $z = 0$ . Радиальный ход потенциала в этой плоскости задается формулой

$$f(r) = 1 - 4 \frac{(r/a)^{\frac{2\pi}{c}-2}}{\left[ (r/a)^{\frac{2\pi}{c}} + 1 \right]^2}. \quad (5)$$

Параметр  $a$  управляет только подобием систем, и, в общем, его можно было бы исключить; параметр  $c$ , дуга фокусировки, напротив, сильно влияет на форму кривых (5) и, вместе с тем, управляет геометрией поля в пространстве и электронно-оптическими свойствами. Вопрос об аналитическом продолжении потенциала (5) с плоскости в пространство авторы решили в виде точных формул, однако в практическом плане расчет эквипотенциального портрета остается весьма сложным делом. Эти квадратурные формулы для (5) при произвольных  $c$  содержат неэлементарные интегралы в комплексной области с трансцендент-

ными особенностями, поэтому для реальных вычислений приходится разрабатывать новые специальные аналитические приемы.

Все эти структуры можно применить к построению малогабаритных энергоанализаторов с большим запасом дисперсии. Наиболее простой вариант (полукруговой) реализуется при  $c = \pi$ . Мы уже изучали достаточно подробно его дисперсионные свойства и поперечную фокусировку. Дисперсия в нем оказалась такой же большой, как и у "Тутанхамона", но поперечная фокусировка I порядка образуется вблизи окружности  $r = 1$ , как раз в области минимальной дисперсии, что снижает привлекательность этого случая. Однако он оказывается интересным с другой, более общей электронно-оптической точки зрения. В свое время Д. К. Максвелл построил оптическую среду с показателем преломления

$$n \approx \frac{1}{\rho^2 + 1}, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (6)$$

Основная часть потенциала (5) при  $a = 1, c = \pi$

$$f \approx \frac{1}{(r^2 + 1)^2}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (7)$$

Оптический и электронно-оптический показатели преломления связаны квадратичной зависимостью, так что (6) и (7) являются аналогами при  $z = 0$ . Среда (6) дает идеальное оптическое изображение точечного объекта, и потому Максвелл назвал ее "Рыбьим глазом". Данный электрический вариант реализует в плоскости  $z = 0$  такую же идеальную электронно-оптическую среду, что позволяет для выразительности назвать "Рыбьим глазом" и энергоанализатор этого типа.

Если рассмотреть аналитическую структуру потенциала в пространстве при  $c = \pi$ , то можно обнаружить, что внеинтегральные члены представляют собой потенциалы пары точечных зарядов, расположенных в точках  $(z = 1, r = 0)$  и  $(z = -1, r = 0)$ , и пары диполей в тех же точках. Таким образом, авторы приходят к идее, что эти точки существенно особые и весь потенциал в целом следует разложить в ряд по мультиполям, расположенным в этих точках. Компьютерная реализация позволила с высокой точностью воспроизвести глобальный эквипотенциальный портрет (рис. 4) с прогнозированием его структуры в области смыкания эквипотенциалей.

Полезную систему можно образно представить в виде округлой по боку осесимметричной коробки, внутри которой соосно расположен круг-

лый электрод в виде несколько деформированного шара. Простейший способ использования этой структуры для энергоанализа в режиме, несколько напоминающем режим работы анализатора Юза-Рожанского. Здесь авторы, конечно, не выигрывают в дисперсии, но зато идеальная фокусировка в плоскости  $z = 0$  и фокусировка I порядка поперек нее позволяет набрать достаточно большую светосилу при высоком уровне разрешения, так как можно работать с малыми выходными диафрагмами порядка 0,1 мм.

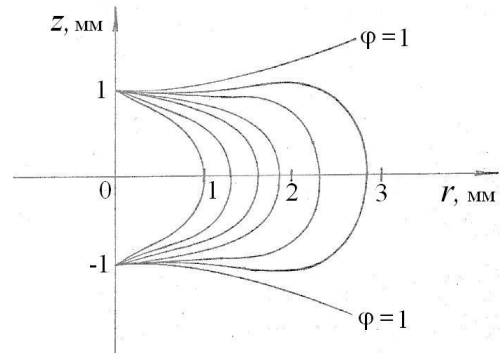


Рис. 4. Эквипотенциальный портрет поля в энергоанализаторе "Рыбий глаз"

Можно предложить еще один вариант использования структур (5) при других значениях  $c$ . Рассмотрим формулу (5) при очень больших значениях  $a$ , но с ростом  $a$  выбор угловой дуги  $c$  подчиним условию

$$ac = 1. \quad (8)$$

Кроме того, положим

$$r = a + \xi. \quad (9)$$

С помощью (8) и (9) преобразуем (5) и рассмотрим предел

$$\begin{aligned} \lim_{a \rightarrow \infty} f &= 1 - 4 \cdot \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\left(1 + \frac{\pi\xi}{\pi a}\right)^{-2}}{\left[\left(1 + \frac{\pi\xi}{\pi a}\right)^{\pi a} + \left(1 + \frac{\pi\xi}{\pi a}\right)^{-\pi a}\right]^2} = \\ &= 1 - 4 \cdot \frac{\lim_{a \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\pi\xi}{\pi a}\right)^{-2}}{\left[\lim_{a \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\pi\xi}{\pi a}\right)^{\pi a} + \lim_{a \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\pi\xi}{\pi a}\right)^{-\pi a}\right]^2}. \end{aligned}$$

Пределы в знаменателе дают классические экспоненты и в результате

$$\lim_{a \rightarrow \infty} f = 1 - \frac{4}{\left(e^{\pi\xi} + e^{-\pi\xi}\right)^2} = 1 - \frac{1}{\text{ch}^2 \pi\xi} = \text{th}^2 \pi\xi.$$

Таким образом, в пределе мы получили из (5) потенциал "Тутанхамона". Процесс увеличения радиуса окружности  $a$ , на которой мы рассматриваем фокусировку, при условии (8) может быть эквивалентен плавному разгибанию системы и превращению ее в двухмерную. Легко понять, что в этих условиях при росте  $a$  электронно-оптические характеристики структуры (5) приближаются к свойствам "Тутанхамона".

Можно двигаться с другой стороны, а именно, начать плавно изгибать электроды "Тутанхамона", превращая их в фигуры вращения и при этом несколько деформируя профиль. Получим ряд систем с идеальной фокусировкой, но с плавно изменяющимися условиями поперечной фокусировки. Электроды с вращательной симметрией можно точить на токарных станках с программным управлением с более высокой точностью, нежели двухмерные цилиндры на фрезерных станках. Следовательно, на этом пути авторы существенно упрощают и удешевляют технологию изготовления.

Переход к таким системам вовсе необязательно связывать с увеличением параметра  $a$ . При конечных значениях  $a$  от него можно избавиться преобразованием подобия, поэтому можно положить  $a = 1$  и переход к "Тутанхамону" будет связан с плавным уменьшением параметра  $c$ . Например, при  $c = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{5}$  получим серию потенциальных профилей, приближающихся к варианту "Тутанхамона":

$$f_1 = 1 - 4 \cdot \frac{r^2}{(r^4 + 1)^2}, \quad f_2 = 1 - 4 \cdot \frac{r^4}{(r^6 + 1)^2},$$

$$f_3 = 1 - 4 \cdot \frac{r^6}{(r^8 + 1)^2}, \quad f_4 = 1 - 4 \cdot \frac{r^8}{(r^{10} + 1)^2}.$$

Все эти потенциальные профили имеют два седла при  $r = 1$  и  $r_k$ , причем с уменьшением  $c$  седло  $r_k$  приближается к значению  $r = 1$  (рис. 5).

Отметим также, что на базе трансаксиальных систем с идеальной фокусировкой можно строить не только компактные перспективные энергоана-

лизаторы, но и монохроматоры и линзы с новыми интересными свойствами.

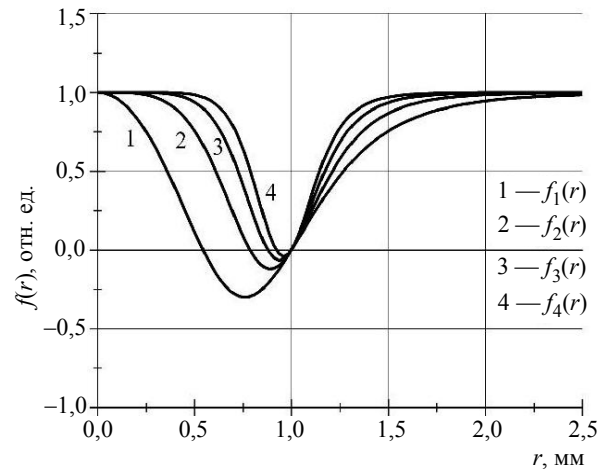


Рис. 5. Профили потенциала для анализаторов, родственные энергоанализатору "Рыбий глаз"

### Заключение

В статье представлены варианты оригинальных энергоанализирующих систем, в которых высокое качество фокусировки сочетается с большой энергетической дисперсией. Поля, реализующие такие свойства, получены на основе теории обратных задач. Этот аналитический подход может быть успешно применен и для других задач электронной и ионной оптики, в частности, для создания малогабаритных приборов с характеристиками, превосходящими традиционные энергоанализирующие устройства.

### Литература

1. Галль Л. Н., Галль Р. Н., Голиков Ю. К., Уткин К. Г. Электростатический энергоанализатор. А. с. 544307. СССР.
2. Голиков Ю. К., Давыдов С. Н., Кораблев В. В. // ПТЭ. 1991. № 4. С. 143.
3. Кудинов Ю. А., Федосеев С. И., Давыдов С. Н., Кораблев В. В. // ПТЭ. 1993. № 4. С. 162.
4. Голиков Ю. К., Чепарухин В. В., Чуваев М. И. // Тр. ЛПИ. № 429. 1989. С. 70.
5. Голиков Ю. К., Уткин К. Г., Григорьев Д. В. // ЖТФ, 1999. Т. 69. № 9. С. 128.
6. Голиков Ю. К., Косячков А. А., Черепин В. Т. Энерго-массоанализатор. А. с. 957317. СССР.

## High dispersion electric fields for energy analysers

*Yu. K. Golikov, N. K. Krasnova, I. A. Martsinovsky*  
Saint-Petersburg State Polytechnic University  
29 Politekhnicheskaya str., St.-Petersburg, 195251, Russia  
E-mail: n.k.krasnova@mail.ru

*In the article, the variants of energy analysers integrating a high quality focusing with a high energy dispersion are suggested. Two dimensional and trans-axial field structures to be offered are solutions of inverse problems which are defined on the base of electron-optical properties to be desired. Some ideas and trends are given to design new systems with high quality electron-optical characteristics.*

PACS: 29.30.Dn, 07.81.+a

*Keywords:* electron spectroscopy, electrostatic energy analysers, inverse problems of analytical mechanics, energy dispersion, energy resolution.

Bibliography — 6 references.

*Received November 18, 2010*

\* \* \*