

12  
**Энергоанализатор заряженных частиц, состоящий из плоского и двугранного углового электродов, с большим диапазоном одновременно регистрируемых энергий**

© Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: fishkova@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2019 г.  
В окончательной редакции 25 сентября 2019 г.  
Принято к публикации 30 сентября 2019 г.

Предложен электростатический двухэлектродный энергоанализатор с электродами простой формы — плоским полезадающим и заземленным угловым. Представлены основные геометрические и электрические параметры такого анализатора. Проведено компьютерное моделирование работы прибора в режиме спектрографа с двумя диапазонами энергий  $E_{\max}/E_{\min}$ , составлявшими 100 и 60. Показано, что в первом диапазоне разрешение по энергии не хуже 1%, а во втором достигает (0.1–0.25)%.

**Ключевые слова:** двухэлектродный энергоанализатор, спектрограф, плоский и двугранный угловой электроды.

DOI: 10.21883/JTF.2020.03.48935.255-19

## Введение

Автором настоящей статьи ранее предложены двухэлектродные спектрометры с электродами в виде двугранных углов различной величины под нулевым потенциалом и полезадающими электродами простой формы в виде плоскости, либо части цилиндрической поверхности [1].

В работе автора [2] получены аналитические формулы для параметров таких спектрометров в зависимости от величины двугранных углов  $\psi = \pi/n$ , где  $n = 1$  соответствует плоскому конденсатору,  $n = 2$  — квадруполю,  $n = 3, 4$  — секстуглолю и октуполю соответственно. Параметры таких спектрометров для двугранных углов величиной  $\psi = \pi/3$  и  $\pi/4$  с распределением потенциала по кубическому и четвертой степени законам соответственно рассчитаны аналитически и опубликованы автором настоящей работы в работах [2,3].

Следует пояснить, что в спектрометрах моноэнергетический пучок заряженных частиц движется вблизи своей центральной траектории по одному и тому же пути, поэтому для анализа пучков различных энергий необходимо каждый раз перестраивать анализатор на соответствующий потенциал настройки. Предпочтительнее иметь возможность одновременного (параллельного) анализа пучков разных энергий, что важно для исследования состава и свойств различного рода материалов, в том числе биологических объектов, особенно при быстро протекающих в них процессах.

Исследование различных спектрометрических сред, создаваемых двухэлектродными электростатическими плоскими и осесимметричными системами с целью одновременной регистрации энергий заряженных частиц,

не дало значительных результатов, так как диапазон одновременно регистрируемых энергий  $E_{\max}/E_{\min}$  составлял всего несколько единиц.

Прорыв произошел, когда автор работы [4] предложил на внешний электрод цилиндрического конденсатора подавать потенциал, возрастающий по линейному закону. В работе [5] были выполнены численные расчеты такой системы, и оказалось, что диапазон одновременно регистрируемых энергий  $E$  сильно возрос до  $E_{\max}/E_{\min} = 24$  при хорошем разрешении по энергии  $\rho = (3.6-4.3) \cdot 10^{-3}$ . Далее в работе [6] предложено использовать в качестве спектрографа плоский конденсатор, на внешний электрод которого по аналогии с [4] подается линейно возрастающее напряжение. При этом возникает поле, меняющееся по линейному закону (аналогично гиперболическому полю квадруполя). При положении источника и пространственно-чувствительного детектора (ПЧД) на границе поля, которой является заземленный нижний электрод плоского конденсатора, имеет место важное свойство — подобие хода траекторий заряженных частиц для различных энергий. В таком режиме в работе [6] получено, что в диапазоне энергий  $E_{\max}/E_{\min} = 25$  существует одинаковое разрешение  $\rho = 5 \cdot 10^{-3}$ . В настоящей работе утверждается, что подача линейно возрастающего напряжения путем разрезания на части внешнего плоского электрода с подачей на них потенциалов, возрастающих по линейному закону, не влияет на электронно-оптические параметры системы.

Исследования электростатических спектрографических сред с плоскими, цилиндрическими и комбинированными конусно-цилиндрическими электродами, внешний из которых разрезан на части, получили развитие

в работах автора настоящей работы (см. Патент [7], а также публикации в ЖТФ и Письмах в ЖТФ за 2015–2018 г.). В них найдены системы с малыми габаритами, позволяющие тем не менее получить большой диапазон одновременно регистрируемых энергий  $E_{\max} = (50-100) \cdot E_{\min}$  при разрешении по энергии не хуже 1%.

В последней работе автора [8] предложен и численно рассчитан малогабаритный светосильный спектрограф с закрытыми торцами, состоящий из внутреннего цилиндрического заземленного электрода и внешнего конического электрода, разрезанного на пять частей, на которые подаются напряжения, возрастающие по предлагаемому в настоящей работе простому закону нечетных чисел. Для такого спектрографа в широкой области изменения энергии пучков заряженных частиц  $E = (1-50) \cdot E_{\min}$  разрешение по энергии при угле раствора пучка, равном одному градусу, составляет  $\rho = (4-9) \cdot 10^{-3}$ .

В работе [9] предложено использовать для электронной спектрографии электростатические поля, однородные по Эйлеру, обратив внимание на наличие в таких полях свойств подобия траекторий заряженных частиц различных энергий. Правда такое подобие существует, только если исследуемый объект (источник вторичных электронов) и детектор находятся на границе поля. В работе [10] аналитическим путем рассчитано большое количество электростатических спектрографов с целочисленными и нецелочисленными показателями однородности  $n$  полей, однородных по Эйлеру, в пределах  $1 \leq n \leq 3$  через  $\Delta n = 0.1$ . Конструкция таких спектрографов состоит (как и в ранних работах автора настоящей работы) из двух электродов, один из которых представляет собой двугранный угол  $\psi$  величиной  $\pi \geq \psi \geq \pi/3$ , а другой имеет вид кривой  $n$ -го порядка. Ввод электронных пучков различных энергий и их детектирование осуществляется на границе двугранного угла. В [10] не приведен очень важный для спектрографов параметр — диапазон одновременно регистрируемых энергий. Кроме того, получено, что разрешающая способность  $R$ -спектрографов, использующих поля, однородные по Эйлеру, по мере роста  $n$  сильно падает. Однако не представляется достоверным, чтобы  $R$  секступоля ( $n = 3$ ) была на порядок меньше, чем у плоского конденсатора ( $n = 1$ ).

Следует особо отметить экспериментальную работу [11], в которой рассчитан и изготовлен двухэлектродный электростатический спектрограф с электродами в виде двугранного угла величиной  $\psi = \pi/2$  и электродом гиперболической формы, которые создают линейное поле. При вынесенном за пределы поля исследуемом объекте такая спектрографическая среда обеспечивает ход траекторий заряженных частиц в широком диапазоне энергий с фокусировкой на грань двугранного угла, вблизи которой расположен плоский позиционно-чувствительный детектор (ПЧД). Приведены оже-спектры различных материалов в диапазоне

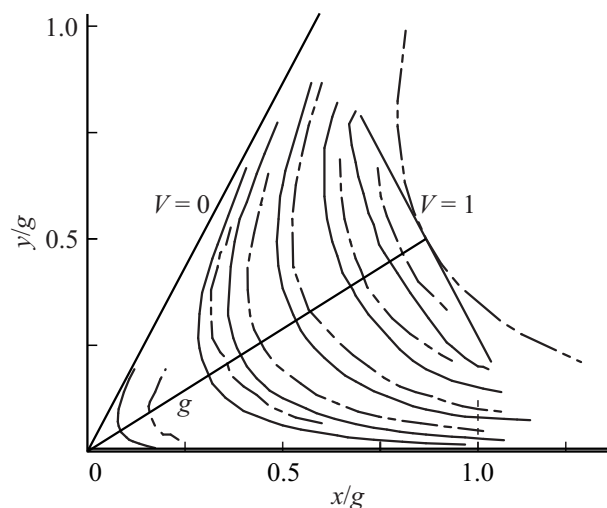
энергий от 100 до (1500–2000) eV с хорошим разрешением по энергии. Недостатком вышеуказанной системы является сложная форма полезадающего электрода.

### Компьютерное моделирование электростатического спектрографа типа двугранный угол

В настоящей работе исследован численно по программе автора ТЕО для плоской задачи „электростатический энергоанализатор–спектрограф простой конструкции“. Точность численных расчетов траекторий заряженных частиц в этой задаче составляет четыре знака при задании их энергий, начальных условий, а также питающих потенциалов на электродах с точностью до четырех знаков. Такая точность проверена путем численного расчета по программе ТЕО плоского конденсатора в режиме энергоанализатора, который имеет аналитическое решение. Что касается разрешения по энергии, то точность его расчета уменьшается до двух знаков, так как в формулу разрешения входит размер сфокусированного пятна, который вычисляется как разность между положениями точек фокусировки крайних траекторий пучка с малым углом раствора.

Исследованный двухэлектродный энергоанализатор состоит из плоского полезадающего электрода, установленного перпендикулярно биссектрисе двугранного угла, и заземленного двугранного уголкового электрода величиной  $\psi = \pi/3$ .

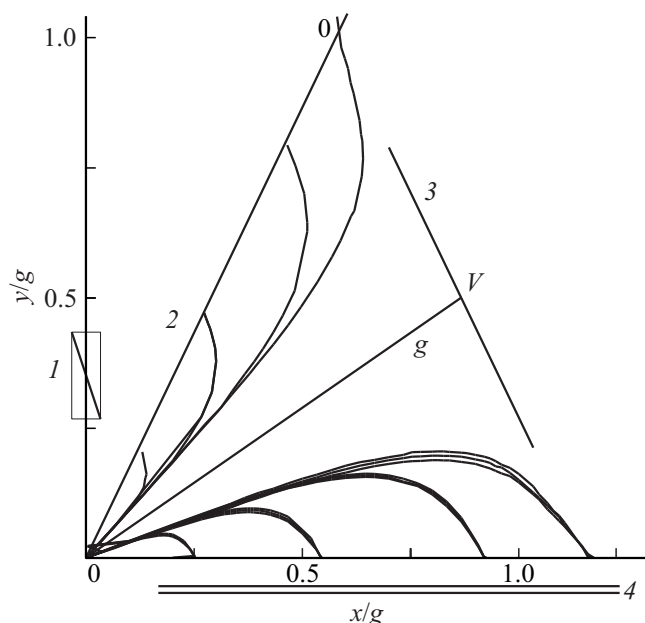
Эквипотенциали в поперечном сечении описанной системы с потенциалом двугранного угла  $V=0$  и с потенциалом плоского электрода  $V=1$  представлены на рис. 1 сплошными линиями. Штриховые линии относятся к



**Рис. 1.** Картина эквипотенциалов спектрографа из двугранного уголкового электрода величиной  $\pi/3$  под потенциалом земли и плоского электрода с полезадающим потенциалом  $V = 1$  (сплошные линии). Штриховыми линиями показаны эквипотенциалы классического секступоля с формой полезадающего электрода в виде кривой третьего порядка  $y \cdot (3x^2 - y^2) = g^3$ .

Параметры двухэлектродного спектрографа из двугранного угла величиной  $\pi/3$  и плоского электрода

$E/E_{\min}$	1	2	5	10	20	30	40	50	60
$x_f/g$	0.278	0.349	0.473	0.598	0.752	0.859	0.941	1.006	1.077
$D/g$	0.093	0.120	0.160	0.197	0.260	0.300	0.310	0.330	0.345



**Рис. 2.** Схема электростатического спектрографа упрощенной конструкции с ходом траекторий заряженных частиц различных энергий, равных последовательно  $E/E_{\min} = 1, 10, 50, 100$ . На схеме введены следующие обозначения: 1 — источник первичного излучения; 2 — электрод в виде двугранного угла величиной  $\pi/3$ ; 3 — плоский электрод; 4 — позиционно-чувствительный детектор.

эквипотенциалам классического секступоля, потенциал которого определяется по известной формуле для кривой третьего порядка, приведенной к используемой в настоящей работе системе координат, более удобной для расчета поля:

$$\varphi(x, y) = V[y \cdot (3x^2 - y^2)]. \quad (1)$$

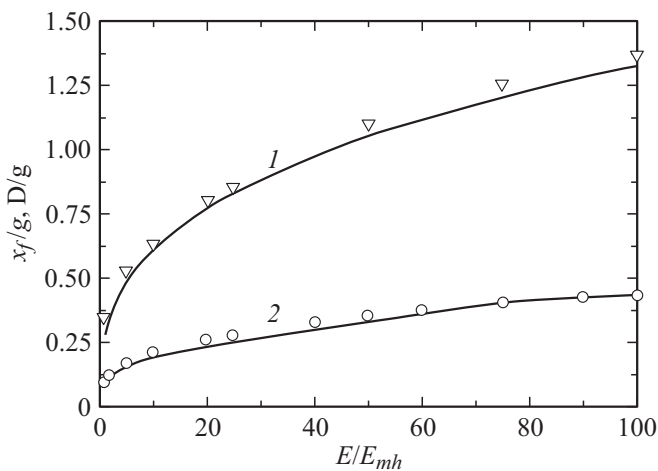
Координаты  $x, y$  выражены в единицах масштабирующего коэффициента  $g$ , приведенного на рис. 1. При  $\varphi = V$  по формуле (1) рассчитана классическая форма ползающего электрода с потенциалом  $V-1$  (рис. 1).

Ввод пучков заряженных частиц осуществляется с границы поля, находящейся на ребре двугранного угла, совпадающего с продольной осью спектрографа. Впервые в плоских системах энергоанализа выход пучков производится через обе грани двугранного угла, при этом в два раза возрастает светосила устройства.

Для продуктивной работы спектрографа в широком диапазоне энергий следует определить оптимальные углы впуска пучков заряженных частиц, а также разность

потенциалов между электродами, при которых происходит фокусировка пучков на позиционно-чувствительные детекторы, устанавливаемые на выходе вблизи обеих граней двугранного угла. Численные расчеты показали, что оптимальным углом впуска центральных траекторий пучков различных энергий является угол  $\theta_1 = 17.0^\circ$ , вокруг которого движутся пучки различных энергий с малыми углами раствора  $\alpha$ , равными  $\pm 0.5^\circ$ . При этом обеспечивается точечная фокусировка пучков на нижнюю грань двугранного угла. Поскольку существует геометрическая симметрия системы относительно биссектрисы двугранного угла, пучки, стартующие под углами  $\theta_2 = 43 \pm 0.5^\circ$ , будут фокусироваться на верхнюю грань двугранного угла на одних и тех же расстояниях по граням от входа в систему. Расчетным путем выяснено, что фокусировка пучков различных энергий по граням происходит при соотношении разности потенциалов между электродами к максимальной энергии пучка  $E_{\max} = 100 \cdot E_{\min}$  следующим образом:  $eV = 0.933 \cdot E_{\max}$ . Здесь  $e$  — заряд частицы (для электрона  $e = -1$ ). Отметим, что выбор вышеприведенных параметров проведен при условии, что пучки занимают практически всю апертуру устройства.

На рис. 2 схематически представлено поперечное сечение двухэлектродного электростатического спектрографа простой конструкции с источником первичного излучения, рабочими электродами простой формы, а также ПЧД, расположенными в свободном от поля пространстве вблизи граней двугранного угла. Расстояние между электродами  $g$  от ребра двугранного угла до ползающего электрода вдоль биссектрисы угла удобно взять в качестве масштабирующего коэффициента для геометрических параметров системы. Его величину можно выбирать из принципа подобия в зависимости от требований конкретной задачи, при этом полученный ранее электрический параметр, связывающий разность потенциалов между электродами с энергией пучков, не меняется. На рис. 2 приведены траектории пучков вторичных электронов с энергиями в диапазоне  $E = (1-100) \cdot E_{\min}$ . Пучки заряженных частиц различных энергий, стартующие под углом к горизонтальной оси  $\theta_1 = 17.0^\circ$  с углом раствора  $\alpha = \pm 0.5^\circ$ , фокусируются на нижнюю грань на расстоянии  $x_f/g$  от ребра двугранного угла. На этом же рисунке приведены центральные траектории пучков, стартующих под углом к горизонтальной оси  $\theta_2 = 43.0^\circ$ , которые попадают на верхнюю грань симметрично (относительно биссектрисы угла) пучкам той



**Рис. 3.** Параметры спектрографа типа „двугранный угол с плоским электродом“ (даны сплошными линиями) в большом диапазоне энергий  $E = (1-100) \cdot E_{min}$  при  $V = 93.3 \cdot E_{min}$ . Точки на кривых относятся к соответствующим параметрам классического секступоля. 1 —  $x_f/g$ , 2 —  $D/g$ .

же энергии, что и на нижней грани. Проверено, что все параметры таких пучков аналогичны параметрам пучков, сфокусированных на нижнюю грань двугранного угла.

На рис. 3 даны геометрические параметры спектрографа — расстояние от входа центральных траекторий пучков до точек фокусировки на границе поля  $x_f$ , а также коэффициент линейной дисперсии по энергии  $D$  — во всем диапазоне одновременно регистрируемых энергий. Точки на кривых соответствуют аналогичным параметрам классического секступоля с формой электрода третьего порядка (1). Различия в величинах  $x_f$  и  $D$  не превышают 4 и 6% соответственно. Разрешение по энергии  $\rho$  в большом диапазоне энергий  $E = (2-75) \cdot E_{min}$  равно  $(2.1-5.2) \cdot 10^{-3}$ . По краям спектра оно ухудшается до  $\rho = (0.6-1.0) \cdot 10^{-2}$ , что связано с малой дисперсией по энергии для энергий  $E < 2 \cdot E_{min}$  и близостью ползающего плоского электрода, который искажает поле классического секступоля вблизи прохождения пучков с энергиями  $75 \cdot E_{min} < E < 100 \cdot E_{min}$ . Следует отметить, что разрешение по энергии классического секступоля во всем диапазоне энергий  $E_{max}/E_{min} = 100$  составляет  $\rho = 2 \cdot 10^{-3}$ .

Улучшения разрешения по энергии, вплоть до  $E_{max} = 60 \cdot E_{min}$ , удалось добиться в режиме работы спектрографа при соотношении  $eV = 1.17 \cdot E_{max}$ . Параметры в предлагаемом режиме работы сведены в таблицу. Расчеты показали, что разрешение по энергии двухэлектродного спектрографа упрощенной конструкции в оптимальном режиме составляет  $\rho = (1.0-2.5) \cdot 10^{-3}$ . Эта величина на порядок лучше, чем приведенная в [10], и в несколько раз лучше величин разрешения по энергии, полученных в работах [4,6,8], к тому же в этих работах диапазон одновременно регистрируемых энергий меньше.

### Краткое заключение по работе

Численно исследован электростатический анализатор в широком диапазоне одновременно регистрируемых энергий. Его простая конструкция, предложенная ранее автором, состоит из двух электродов — плоского и двугранного уголкового величиной  $\pi/3$ . При положении источника и ПЧД вторичных электронов на границе поля найдены оптимальные режимы работы такого анализатора в режиме спектрографа с большим диапазоном энергий  $E_{max}/E_{min} = 100$  и средним диапазоном  $E_{max}/E_{min} = 60$ . Во втором режиме разрешение по энергии улучшается практически на порядок. Конструкция и питание такого спектрографа проще по сравнению со спектрографами с разрезным внешним электродом [4-8], его габариты невелики и в рабочей плоскости не превышают  $1.2 \times 1.2$  расстояния от ребра двугранного угла по его биссектрисе до плоского электрода.

На основе двухэлектродного спектрографа с плоским и двугранным уголковыми электродами планируется исследование его осесимметричного варианта.

### Финансирование работы

Работа была выполнена в рамках Госзадания по теме № 0040-2019-0023.

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Фишкова Т.Я. А. с. № 1275587. Оpubл. 07.12.86. Бюл. 45.
- [2] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 7. С. 1358-1364.
- [3] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 10. С. 2071-2076.
- [4] Read F.H. // Rev. Sci. Instr. 2002. Vol. 73. N 3. P. 1129-1139.
- [5] Read F.H. Cubric D. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. Vol. 519. P. 338.
- [6] Баранова Л.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 85-89.
- [7] Пат. РФ № 176329. Электростатический анализатор энергии заряженных частиц / Т.Я. Фишкова. 2018. Бюлл. № 2.
- [8] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 5. С. 796-798.
- [9] Голиков Ю.К., Краснова Н.К. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 2. С. 9-15.
- [10] Аверин И.А. // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 3. С. 35-41.
- [11] Cubric D. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. Vol. 645. P. 227-233.