

02;12;13

Многоканальный энергоанализатор заряженных частиц из двух коаксиальных цилиндров с дискретным внешним цилиндром и плоскими торцевыми электродами

© Т.Я. Фишкова

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

Поступило в Редакцию 22 декабря 2016 г.

Путем компьютерного моделирования найдены параметры предложенного автором светосильного многоканального анализатора заряженных частиц по энергии простой конструкции в виде цилиндрического конденсатора с дискретным внешним цилиндром и закрытыми торцами в широком диапазоне одновременно регистрируемых энергий ($E_{\max}/E_{\min} = 100$). При введении дополнительного цилиндрического электрода малых размеров вблизи переднего торца системы удастся более чем на порядок улучшить разрешение в области малых энергий. При этом разрешение энергоанализатора во всем указанном диапазоне энергий составляет $\rho = (4-6) \cdot 10^{-3}$.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.11.44693.16653

Для обеспечения экспресс-анализа состава материалов, технического контроля изделий различных отраслей промышленности, а также ввиду широких исследований различного рода биологических объектов, в частности радиационной терапии, по энергетическому спектру вторичных частиц, исходящих с поверхности или из объема тех или иных веществ, используются многоканальные электростатические анализаторы (спектрографы). Основная проблема состоит в создании распределения электростатического поля, позволяющего одновременно фокусировать электронные потоки с энергиями, различающимися в десятки раз, причем объект исследования и детектор должны быть вынесены за пределы поля. Поставленная проблема решается предло-

женным автором светосильным спектрографом [1], рассмотренным и усовершенствованным в настоящей работе.

Ранее был исследован спектрограф [2], представляющий собой цилиндрический конденсатор с разрезанным внешним цилиндром, на части которого подаются напряжения, возрастающие по линейному закону. Однако диапазон одновременно регистрируемых энергий E у него не превышает величины $E_{\max}/E_{\min} = 24$, причем лишь в случае пренебрежения краевыми эффектами, возникающими из-за наличия у системы открытых торцов. Следует отметить также, что в спектрографе [2] исследуемый объект — источник вторичных электронов, а также источники различного рода первичных излучений могут располагаться лишь внутри цилиндрического электрода меньшего диаметра, что непригодно для практического использования.

Интерес представляют спектрографы с плоскими электродами, свободные от указанных выше конструктивных недостатков, в которых удается расширить диапазон одновременного энергоанализа сфокусированных на плоский позиционно-чувствительный детектор пучков заряженных частиц до $E_{\max}/E_{\min} = 50$ при вынесенных за пределы поля исследуемого объекта и детекторе [3]. Однако существенным недостатком спектрографов из плоских электродов является малая светосила, поскольку фокусировка пучков заряженных частиц может быть осуществлена лишь в одной плоскости.

Задача о нахождении электронно-оптических свойств предложенного светосильного спектрографа [1], а также его усовершенствованной конструкции решается по написанной с участием автора настоящей работы программе ТЕО для расчета различного рода полей и траекторий заряженных частиц в осесимметричных и плоских электростатических системах. Результаты проверки точности расчетов по ТЕО плоского и цилиндрического конденсаторов, для которых имеются аналитические выражения для полей, а также аналитические решения дифференциальных уравнений траекторий заряженных частиц, показали, что расхождения не превышают (0.1–0.5)% в зависимости от размеров ячеек сетки в программе ТЕО. Исследованная в настоящей работе конструкция спектрографа схематически представлена на рис. 1. Он состоит из коаксиально расположенных внешнего и внутреннего цилиндрических электродов, а также плоских электродов, закрепленных на торцах внутреннего цилиндра, которые не только участвуют в образовании требуемого для решения задачи электростатического поля, но

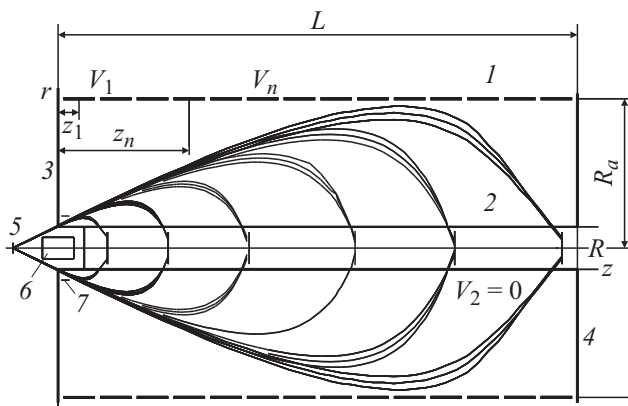


Рис. 1. Схема светосильного спектрографа с дополнительным цилиндрическим электродом и траектории пучков заряженных частиц при отношениях энергий пучков к их минимальной энергии, последовательно равных $E/E_{\min} = 1, 10, 25, 50, 75, 100$. 1 — внешний разрезной цилиндрический электрод, 2 — внутренний цилиндрический электрод, 3, 4 — плоские электроды по торцам системы, 5 — исследуемый объект, 6 — источник первичных электронов либо другого рода излучений, 7 — дополнительный цилиндрический электрод.

и одновременно препятствуют проникновению в рабочее пространство посторонних полей.

Внешний цилиндрический электрод выполнен из $n \geq 10$ цилиндрических электрически изолированных частей одинакового радиуса, подсоединенных к источнику питания, выполненному с возможностью подачи на части внешнего электрода линейно возрастающего напряжения. Внутренний цилиндрический электрод заземлен и снабжен выходными кольцевыми щелями, затянутыми металлической сеткой.

Длина цилиндрических частей внешнего электрода удовлетворяет соотношению $ln \leq 2R$, расстояние между ними удовлетворяет соотношению $s_n \leq 0.5R$, где R — радиус внутреннего цилиндрического электрода. Следует отметить, что здесь и в дальнейшем все линейные размеры, а также геометрические параметры спектрографа: положение объекта и точек фокусировки пучков различных энергий, коэффициенты линейной дисперсии по энергии — выражены в единицах R . Поэтому, выбрав любой нужный для решения той или иной задачи

размер внутреннего цилиндрического электрода, можно определить все геометрические и электронно-оптические параметры предлагаемого устройства.

Исследуемый объект (источник вторичных электронов), а также источник первичных электронов (электронная пушка) либо источник другого рода излучений размещены за пределами поля. Детектор состоит из набора плоских электродов, которые подключены к многоканальному измерительному устройству и установлены за выходными щелями во внутреннем цилиндре перпендикулярно его оси.

После необходимой оптимизации путем численных расчетов по программе ТЕО выбраны геометрические параметры исследуемого в настоящей статье спектрографа. Они таковы: внешний цилиндрический электрод имеет радиус $R_a = 7R$ и выполнен из $n = 14$ электрически изолированных частей одинакового радиуса, длина которых равна $l_n = 1.5R$ при расстоянии между ними, равном $s_n = 0.25R$; продольный размер системы — расстояние между торцевыми электродами менее чем в два раза превышает поперечный и равен $L = 24.5R$. Части разрезного внешнего цилиндра подсоединены к источнику питания, обеспечивающему возможность подачи на них напряжения, возрастающего по линейному закону. При этом величины потенциалов на частях дискретного электрода равны $V_n = V_1(z_n/z_1)$, где V_1 — потенциал на первой части дискретного электрода, $z_n = z_1[1 + 1.75(n - 1)]$ — расстояние от середины каждой части до переднего торца системы, n — порядковый номер соответствующей части.

Как показали расчеты автора, приведенные в заявке на полезную модель [1], для описанной системы диапазон одновременно регистрируемых энергий при фокусировке пучков различных энергий на внутренний цилиндрический электрод достигает $E_{\max}/E_{\min} = 50$. В настоящей работе исследовалась возможность увеличения диапазона энергий за счет изменения трех независимых параметров: питающих потенциалов на разрезном цилиндрическом электроде; положения источника z_i (расстояние вдоль продольной оси системы от объекта до передней стенки спектрографа), а также углов впуска пучков заряженных частиц в поле. Компьютерное моделирование описанного выше спектрографа показало, что оптимальными оказались $V_1 = (4.5E_{\min})/e$, расстояние от переднего торца системы до исследуемого объекта, вынесенного за пределы поля, $z_i = 2.2R$ и начальные углы впуска пучков заряженных частиц различных энергий равны $\theta = 25.5^\circ \pm 0.5^\circ$. При указанных

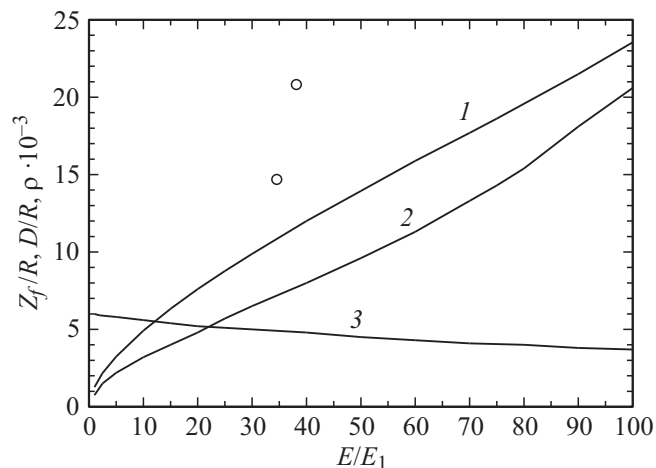


Рис. 2. Основные параметры цилиндрического спектрографа в широком диапазоне регистрируемых энергий $E_{\max}/E_{\min} = 100$: 1 — положение точек фокусировки на внутреннем цилиндре z_f/R , 2 — величина коэффициента линейной дисперсии по энергии D/R , 3 — энергетическое разрешение спектрографа ρ .

параметрах диапазон одновременно регистрируемых энергий может быть повышен до $E_{\max}/E_{\min} = 100$. На рис. 2 приведены основные рабочие характеристики спектрографа в указанном диапазоне энергий: z_f/R — положения центральных траекторий, сфокусированных на внутреннем цилиндре кольцевых пучков, D/R — величины коэффициентов линейной дисперсии по энергии, а также разрешение спектрографа по энергии $\rho = \Delta E/E$. Следует отметить, что хорошее разрешение для малых энергий в области $E/E_{\min} = (1-10)$ достигнуто благодаря введению вблизи области прохождения пучков рядом с передним торцом спектрографа дополнительного цилиндрического электрода малых размеров. Численные расчеты показали, что для него оптимальными являются следующие геометрические параметры: радиус $r = 1.5R$, длина $l = 0.3R$, расстояние от переднего торца системы $s = 0.05R$, потенциал дополнительного электрода оказался равным $u = 0.1V_1$. Такой электрод значительно улучшает фокусировку на внутренний цилиндр пучков малых энергий, что ведет к существенному улучшению разрешения

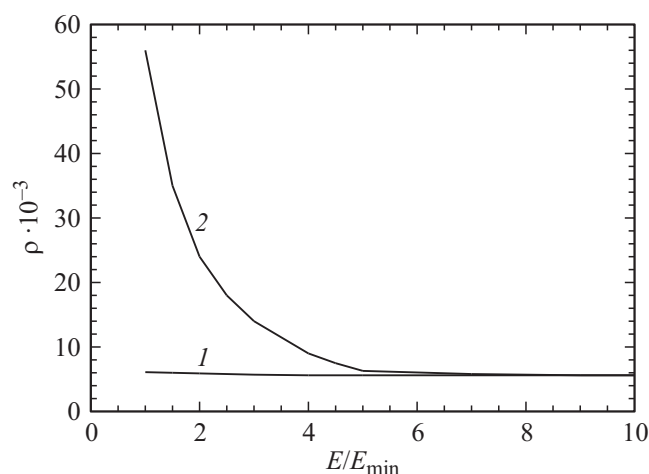


Рис. 3. Разрешение спектрографа для малых энергий: 1 — при наличии дополнительного электрода, 2 — в случае его отсутствия.

спектрографа по энергии (см. кривую 1, рис. 3). Для сравнения на этом рисунке дана кривая 2, которая соответствует разрешению по энергии в отсутствие дополнительного электрода. Видно, что для минимальной энергии при использовании дополнительного электрода выигрыш в разрешении составляет более 50 раз. Для средних и больших энергий в диапазоне $10 < E/E_{\min} < 100$ наличие дополнительного малого цилиндрического электрода на фокусировку не влияет.

В заключение следует отметить, что предложенный автором и оптимизированный в настоящей статье электростатический спектрограф из двух коаксиальных цилиндров с разрезным внешним цилиндром и плоскими торцевыми электродами является лучшим из всех известных к настоящему времени спектрографов из-за большой светосилы, которая примерно на два порядка выше, чем у различных спектрографов, состоящих из плоских электродов, один из которых разрезан на части. При этом главные параметры, а именно диапазон одновременно регистрируемых энергий и разрешение по энергии предлагаемого спектрографа из цилиндрических электродов, не уступают лучшим системам из плоских электродов.

Список литературы

- [1] *Фишкова Т.Я.* Электростатический анализатор энергии заряженных частиц: Решение от 30.11.2016 о выдаче патента на полезную модель № 2016122283 от 06.06.2016.
- [2] *Read F.H.* // Rev. Sci. Instr. 2002. V. 73. N 3. P. 1129–1139.
- [3] *Фишкова Т.Я.* // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 101.