

Электростатический спектрограф с дискретным комбинированным внешним электродом в различных диапазонах 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 29 ноября 2017 г.)

Предложен и численно рассчитан электростатический спектрограф высокой светосилы из двух коаксиальных электродов, один из которых конусно-цилиндрической формы разрезан на части, с дополнительным цилиндрическим электродом малых размеров. Найдены его питающие напряжения, обеспечивающие острую фокусировку пучков заряженных частиц в начальной области спектра для различных диапазонов одновременно регистрируемых энергий $E_{\max}/E_{\min} = (25-100)$. Рассчитаны электронно-оптические параметры спектрографа в четырех диапазонах энергий, причем для заряженных частиц средних и высоких энергий используется закон электрического подобия. Величина разрешения спектрографа для средних и высоких энергий $E = (0.1-1)E_{\max}$ равна $(5-3) \cdot 10^{-3}$. Для малых энергий $E = (0.01-0.1)E_{\max}$ разрешение ухудшается и с ростом диапазона одновременно регистрируемых энергий меняется в пределах $(0.6-1.6) \cdot 10^{-2}$.

DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46185.2575

Ранее автором настоящей работы предложен и рассчитан светосильный электростатический спектрограф высокого разрешения по энергии [1,2] с большим диапазоном одновременно регистрируемых энергий, равным $E_{\max}/E_{\min} = 50$.

Целью настоящей работы является нахождение возможности изменения в широких пределах диапазона одновременно регистрируемых энергий пучков заряженных частиц при неизменной геометрии спектрографа. Известно, что в оптике заряженных частиц для электростатических систем существует закон электрического подобия, при котором пропорциональное изменение отношения питающих электроды напряжений к энергии заряженных частиц не меняет электронно-оптических параметров системы. Однако в исследуемом спектрографе передний плоский торцевой электрод заземлен, и вблизи него закона электрического подобия не существует. Поэтому имеется проблема с пучками низких энергий, фокусировка которых происходит вблизи заземленной стенки, через которую осуществляется ввод пучков заряженных частиц.

Конструкция исследованного спектрографа схематически приведена на рис. 1. Он состоит из двух коаксиальных электродов с закрытыми торцами, один из которых — внутренний — выполнен в виде цилиндра радиуса R , а второй — внешний — в виде конусно-цилиндрического раструба, разрезанного на части с углом полураствора конусной части $\beta = 10^\circ$ и длиной H . Величина малого радиуса конусного электрода $R_b = 5R$, а величина его большого радиуса, равная радиусу цилиндрического сегмента внешнего электрода, составляет $R_a = 7.5R$. При общей длине анализатора $L = 25R$ внешний комбинированный электрод разбит на равные

части длиной $1.5R$ при расстояниях между ними $0.25R$, причем последние три части длиной h объединены. Передний плоский торцевой электрод, через который осуществляется впуск заряженных частиц, соединен с внутренним цилиндром. Задний торцевой электрод соединен с последней частью цилиндрического участка внешнего электрода. В отличие от спектрографа [2] в исследуемый спектрограф вблизи его переднего торца введен дополнительный цилиндрический электрод малой длины, служащий для улучшения фокусировки пучков заряженных частиц на внутренний цилиндрический электрод.

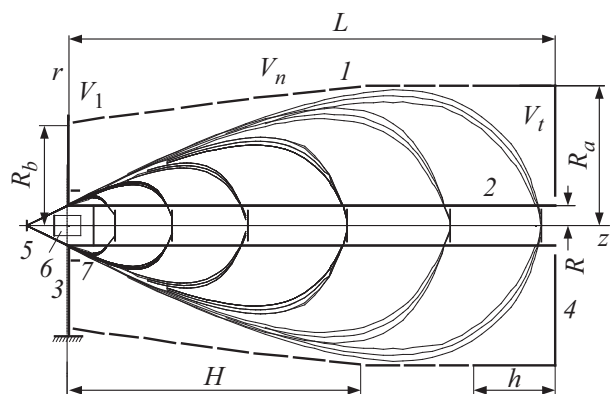


Рис. 1. Схема светосильного электростатического спектрографа и траекторий пучков заряженных частиц различных энергий: 1 — внешний разрезной конусно-цилиндрический электрод, 2 — внутренний цилиндрический электрод, 3 — передний плоский торцевой электрод, 4 — задний плоский торцевой электрод, 5 — исследуемый объект, 6 — источник первичного излучения, 7 — дополнительный цилиндрический электрод.

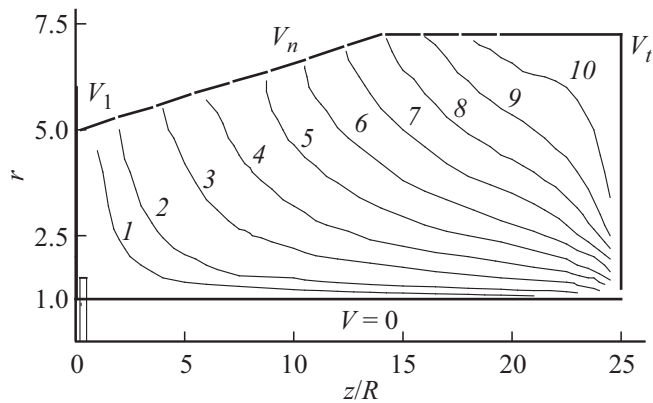


Рис. 2. Распределение потенциала спектрографа, представленного на рис. 1, в рабочей области формирования траекторий заряженных частиц средних и высоких энергий для произвольного диапазона одновременно регистрируемых энергий. Картина поля имеет аксиальную симметрию относительно продольной оси z .

трод с энергиями вблизи минимальной в различных диапазонах одновременно регистрируемых энергий.

Питание внешнего разрезного конусно-цилиндрического электрода осуществлялось по линейному закону $V_n = V_1[1 + 1.75(n - 1)]$, где V_1 и V_n — потенциалы на первом по ходу пучка и последующих участках разрезного электрода соответственно, n — порядковый номер участков, отсчитываемый от передней торцевой стенки. Последний участок цилиндрического сегмента внешнего электрода соединен электрически с задней торцевой стенкой и имеет оптимизированный с точки зрения наилучшей фокусировки пучков высоких энергий потенциал V_t , величина которого равна $V_t = 19.5V_1$. Внутренний цилиндрический электрод вместе с передней торцевой стенкой заземлен.

Распределение потенциала в рабочей области энергоанализатора для пучков заряженных частиц средних и больших энергий представлено на рис. 2. Величины эквипотенциалей φ даны, начиная с $\varphi = V_1$ (кривая 1), далее $\varphi = 2V_1$ (кривая 2), остальные величины эквипотенциалей на кривых 3–10 последовательно увеличиваются на $\delta\varphi = 2V_1$. В этой области картина поля неизменна для любого диапазона одновременно регистрируемых энергий $k = E_{\max}/E_{\min}$ и не зависит от наличия дополнительного цилиндрического электрода с потенциалом U . Небольшое изменение поля влияет лишь на пучки малых энергий, оставляя ход траекторий частиц средних и больших энергий без изменений. Величины напряжений V_n , в том числе потенциал первой по ходу пучка части разрезного электрода V_1 (в которой выражены все электрические параметры системы), определяется из условий фокусировки на внутренний цилиндрический электрод пучков заряженных частиц в широком диапазоне одновременно регистрируемых энергий, равном $E = (1 - 100)E_{\min}$.

Таблица 1. Электронно-оптические параметры спектрографа в области средних и высоких энергий

E/E_{\min}	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
z_f/R	4.70	6.09	7.37	9.74	12.0	14.1	16.1	18.2	20.1	21.9	23.9
D/R	3.0	4.1	5.0	6.8	9.0	10.0	12.0	13.7	14.8	15.8	21.0
$\rho \cdot 10^{-3}$	5.4	4.4	2.6	2.4	2.8	3.1	3.0	2.7	2.5	2.2	2.4

В исследуемой системе закон электрического подобия существует в довольно большом диапазоне средних и высоких энергий. Для них численно по программе ТЕО определены основные электронно-оптические параметры спектрографа с приведенной выше геометрией и питанием в диапазоне одновременно регистрируемых энергий $E = (0.1 - 1)E_{\max}$. В табл. 1 приведены параметры, относящиеся к случаю фокусировки пучков в диапазоне энергий $E = (10 - 100)E_{\min}$ на внутренний цилиндрический электрод при $V_1 = 4.4(E_{\min}/e)$, где e — заряд рабочей частицы. В таблице введены следующие обозначения: z_f/R — расстояния от входа заряженных частиц в систему до точек их фокусировки на внутренний цилиндрический электрод, D/R — коэффициент линейной дисперсии по энергии, ρ — разрешение спектрографа по энергии при углах входа пучка к продольной оси системы, равным $\theta = (26.6 \pm 0.5)^\circ$. Эти параметры сохраняются при пропорциональном изменении диапазона энергий в пределах $k = (100 - 25)$, если при этом питающее напряжение на частях разрезного конусно-цилиндрического электрода, равные $V_{nk} = V_{1k}[1 + 1.75(n - 1)]$, меняются, а величина V_{1k} в соответствии с законом электрического подобия равна $V_{1k} = (4.4 - 1.1)(E_{\min}/e)$. Из табл. 1 видно, что с ростом энергии растет дисперсия и благодаря хорошей фокусировке на внутренний цилиндрический электрод разрешение по энергии спектрографа составляет $(4.4 - 5.4) \cdot 10^{-3}$. Следует отметить, что малый диапазон одновременно регистрируемых энергий ($k \leq 20$) представляет меньший интерес и в работе не рассматривается.

Для минимальной и близких к ней энергий пучков электрического подобия не существует вследствие наличия заземленной передней торцевой стенки, в которой через затянутую сеткой диафрагму производится выпуск заряженных частиц. При этом линейные параметры z_f/R и D/R практически не отличаются от величин, полученных по закону электрического подобия. Однако острота фокусировки пучков малых энергий на внутренний цилиндрический электрод системы сильно ухудшается. Поэтому независимо от диапазона регистрируемых энергий в начальной области спектра происходит недопустимое падение разрешения спектрографа.

Для улучшения фокусировки пучков низких энергий вблизи переднего торцевого электрода введем цилиндрический электрод малых размеров радиусом $r = 1.5R$ и длиной $l = 0.3R$, работа которого дала положительные результаты в многоканальном энергоанализаторе с

внешним разрезным цилиндрическим электродом (см. работу [3]). Численные расчеты показали, что оптимальная фокусировка пучков малых энергий в начальной области спектра $E < 0.1E_{\max}$ зависит от диапазона одновременно регистрируемых энергий k . Она достигается при потенциалах на дополнительном цилиндрическом электроде, величина которого U_k в единицах потенциала на первой части внешнего разрезного электрода V_{1k} представлена на рис. 3. Поскольку с ростом диапазона энергий относительная величина потенциала дополнительного электрода уменьшается, а величина потенциалов на частях разрезного электрода V_{1k} растет по линейному закону, то абсолютная величина U_k меняется незначительно.

Для различных диапазонов энергий рассчитано распределение потенциалов в области вблизи дополнительного электрода. Оказалось, что небольшое изменение поля вблизи дополнительного электрода влияет лишь на

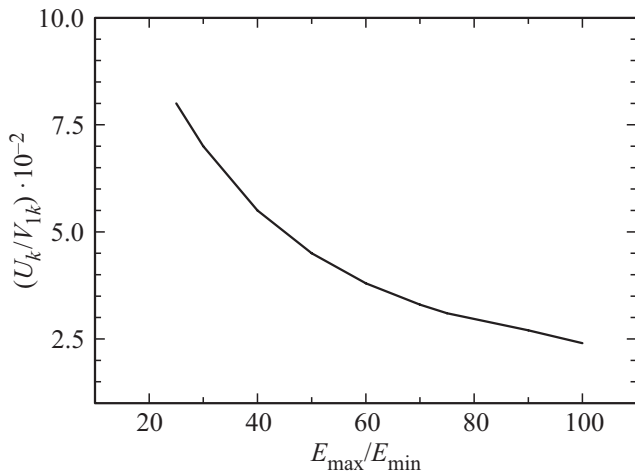


Рис. 3. Зависимость величины потенциала дополнительного цилиндрического электрода от диапазона одновременно регистрируемых энергий.

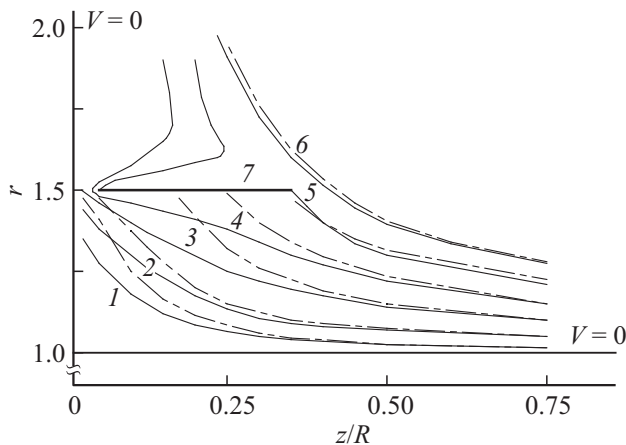


Рис. 4. Распределение потенциала спектрографа вблизи дополнительного цилиндрического электрода 7. Картина поля имеет аксиальную симметрию относительно продольной оси z .

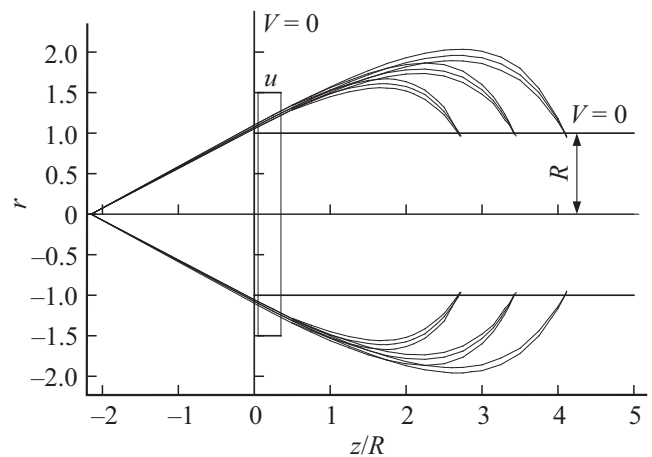


Рис. 5. Ход траекторий заряженных частиц низких энергий последовательно при $E = E_{\min}$, $E = 1.5E_{\min}$, $E = 2E_{\min}$ при общем диапазоне одновременно регистрируемых энергий $E_{\max}/E_{\min} = 25$.

Таблица 2. Электронно-оптические параметры спектрографа в области малых энергий

	$k = 25$				$k = 50$			
E/E_{\min}	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.5	5.0
z_f/R	2.70	3.43	4.10	4.70	1.80	2.28	3.08	4.70
D/R	1.58	1.94	2.53	2.95	1.0	1.25	1.80	2.95
$\rho \cdot 10^{-2}$	0.60	0.49	0.40	0.37	1.0	0.88	0.86	0.53
	$k = 75$				$k = 100$			
E/E_{\min}	1.0	2.0	3.0	5.0	1.0	2.5	5.0	7.5
z_f/R	1.45	2.14	2.43	3.56	1.25	2.06	3.08	3.95
D/R	0.8	1.3	1.6	2.2	0.63	1.15	1.80	2.37
$\rho \cdot 10^{-2}$	1.1	1.1	1.0	0.86	1.6	1.5	1.2	1.0

пучки малых энергий, а ход траекторий частиц средних и больших энергий не изменяется.

В качестве примера на рис. 4 сплошными линиями приведена картина эквипотенциалей с дополнительным электродом, потенциал которого равен $U = 0.08V_1$ при $V_1 = 1.1(E_{\min}/e)$ для диапазона одновременно регистрируемых энергий $k = 25$. Штриховыми линиями обозначены эквипотенциалы в отсутствие дополнительного электрода. Величины эквипотенциалей ϕ имеют следующие значения: кривая 1 — $\phi = 0.01V_1$, 2 — $\phi = 0.02V_1$, 3 — $\phi = 0.04V_1$, 4 — $\phi = 0.06V_1$, 5 — $\phi = 0.08V_1$, 6 — $\phi = 0.10V_1$. На рис. 5 даны траектории пучков заряженных частиц в начальной области спектра для электростатического спектрографа, поле которого представлено на рис. 4.

Основные электронно-оптические параметры в начальной области спектра для четырех диапазонов одновременно регистрируемых энергий приведены в табл. 2. Следует отметить, что в области низких энергий дисперсия мала, и хотя с помощью дополнительного электрода

достигнута острая фокусировка на внутренний цилиндрический электрод, разрешение при низких энергиях хуже, чем при средних и высоких энергиях.

В заключение отметим, что для предложенного и рассчитанного автором ранее электростатического спектрографа [1,2] найдены электронно-оптические параметры в различных диапазонах одновременно регистрируемых энергий. При средних и больших энергиях это достигается путем электрического подобия. Для низких энергий электрического подобия не существует из-за наличия плоского заземленного электрода вблизи переднего торца системы, необходимого для предотвращения краевых полей, поэтому поставленная задача решается путем введения дополнительного цилиндрического электрода малых размеров, не оказывающего влияния на заряженные частицы средних и высоких энергий.

Список литературы

- [1] *Фишкова Т.Я.* Электростатический анализатор энергии заряженных частиц. Патент на полезную модель № 176329. 17.01.2018. Бюлл. № 2. 2818.
- [2] *Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 1. С. 117–120.
- [3] *Фишкова Т.Я.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 11. С. 26–32. [Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43. N 6. P. 514–516.]