

## Светосильный спектрограф с большим диапазоном параллельно регистрируемых энергий заряженных частиц

© Т.Я. Фишкова

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

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2015 г.  
В окончательной редакции 10 февраля 2016 г.)

Проведено компьютерное моделирование электростатического спектрографа большой светосилы с параллельной (одновременной) регистрацией энергий заряженных частиц в диапазоне  $E_{\max}/E_{\min} = 25$  и 50. Конструкция спектрографа представляет собой два коаксиальных цилиндра с плоскими торцевыми электродами, причем цилиндр большего диаметра разрезан на части, потенциал которых меняется по линейному закону. В таком устройстве в режиме с вынесенным за пределы поля объектом исследования найдены геометрические и электрические параметры, обеспечивающие фокусировку пучков во всем диапазоне регистрируемых энергий при разрешении по энергии в пределах (0.4–1.1)%.

### Введение

В последнее время ввиду широкого применения радиационной биологии и радиационной терапии возникает необходимость исследования биологических объектов. При этом особенно важно достичь количественного понимания процессов ионизации, а также энергии связи различного рода биологических молекул [1,2]. Для определения свойств тех или иных материалов по энергетическому спектру вторичных частиц, исходящих с их поверхности или из объема, используются многоканальные электростатические анализаторы (спектрографы) чаще всего в виде плоского конденсатора. При углах входа и выхода центральных траекторий пучков заряженных частиц, равных  $45^\circ$ , обеспечивается возможность регистрации широкого спектра по энергии (см., в частности, [1]). Однако существенными недостатками такого устройства являются необходимость (с целью достижения фокусировки пучков различных энергий) располагать исследуемый объект непосредственно на одном из плоских электродов, открытые торцы конденсатора, способствующие краевым эффектам, а также большая длина системы из-за линейной зависимости базовой длины от энергии заряженных частиц. Более перспективны энергоанализаторы, исследованные в работах [3,4]. Они представляют собой цилиндрический [3] или плоский [4] конденсаторы, причем один из электродов разрезан на части, на которые подаются напряжения, возрастающие по линейному закону. Однако и в описанных спектрографах также наличествуют открытые торцы, кроме того, диапазон одновременно регистрируемых энергий у них не превышает величины  $E_{\max}/E_{\min} = 25$ . Кроме того, следует отметить, что в светосильном цилиндрическом спектрографе [3] решена чисто электронно-оптическая задача о фокусировке заряженных частиц в режимах „ось-внутренний цилиндр“ и „ось-ось“. При этом в обоих вариантах источник вторичных частиц (исследуемый

объект), а также аппаратура для создания первичного пучка либо рентгеновского излучения могут располагаться лишь внутри цилиндрического электрода меньшего диаметра, что мало пригодно для практического применения. Более того, фокусировка на ось возможна лишь при подаче на заднюю стенку системы нескольких дополнительных потенциалов, что усложняет и конструкцию, и питание.

Наибольший интерес представляют спектрографы, свободные от указанных выше конструктивных недостатков, в которых удастся расширить диапазон параллельного энергоанализа сфокусированных на позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) пучков заряженных частиц. Так, в работах автора настоящей работы предложен и исследован спектрограф простой конструкции из плоского разрезного электрода, на который подаются потенциалы, изменяющиеся по различным законам, и коробчатого заземленного электрода [5]. Оказалось, что при уменьшении показателя роста питающего потенциала диапазон параллельно регистрируемых энергий растет и при питании дискретного электрода по закону, пропорциональному корню четвертой степени расстояний, определяющих положение той или иной части разрезного электрода относительно переднего торца спектрографа, достигает рекордного диапазона —  $E_{\max}/E_{\min} = 200$ . Однако наилучшее разрешение по энергии обеспечивается при линейном законе возрастания величин потенциалов на дискретном плоском электроде, но в меньшем диапазоне энергий  $E_{\max}/E_{\min} = 50$  [6]. Существенным недостатком спектрографов из плоских электродов является малая светосила, поскольку у них отсутствует фокусировка в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии.

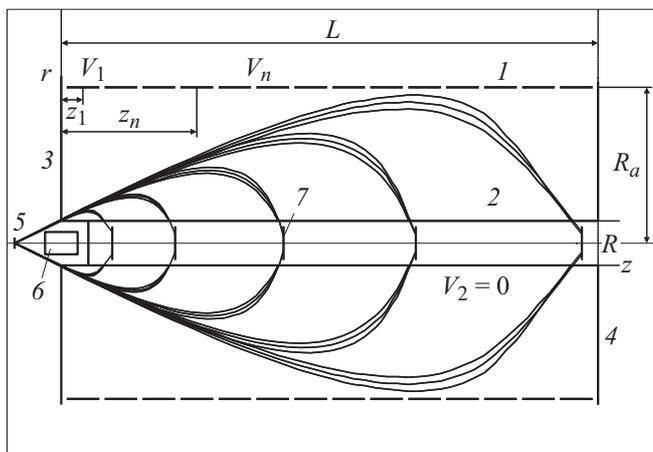
Широко известно, что осесимметричные системы в сагитальной плоскости, перпендикулярной меридиональной плоскости дисперсии ( $r, z$ ) (рис. 1), собирают пучки заряженных частиц при углах раствора вплоть до

$\gamma = \pm\pi/2$ , поэтому целью настоящей работы стало повышение светосилы электростатического спектрографа, конструкция которого состоит из коаксиальных цилиндрических электродов, но в отличие от [3] с закрытыми торцами и вынесенным за пределы поля исследуемым объектом.

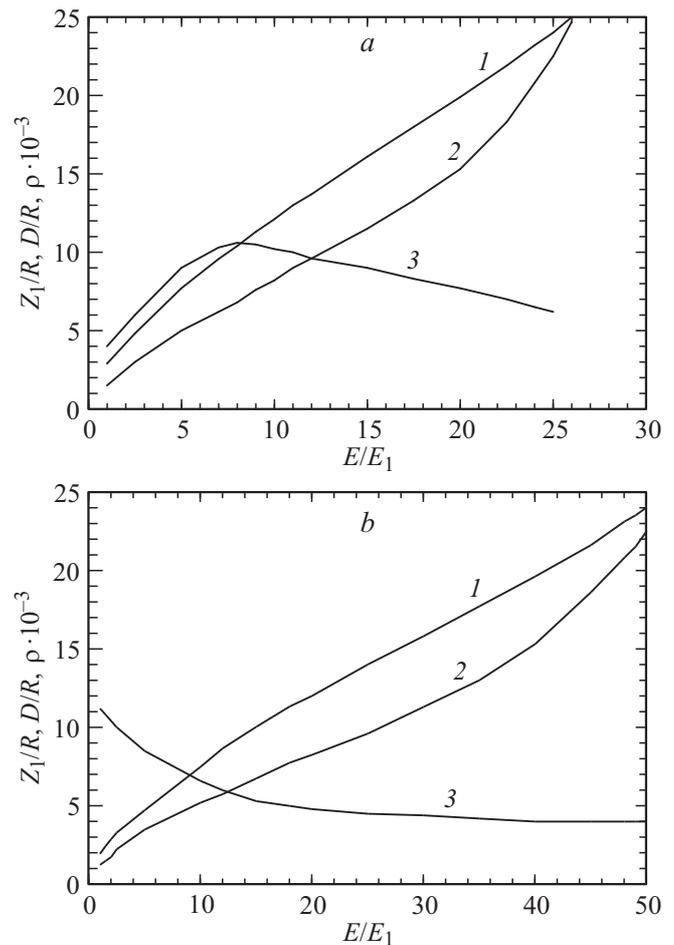
## Компьютерное моделирование

С помощью компьютерного моделирования по программе автора ТЕО выбрана геометрия и найдены оптимальные режимы работы спектрографа, состоящего из двух коаксиальных цилиндров с закрытыми торцами, один из которых разрезан на части, на которые подаются величины потенциалов, увеличивающиеся по линейному закону, а другой цилиндрический электрод и торцевые пластины заземлены. Все расчеты проведены при вынесенном за пределы спектрографа объекте исследования. Устройство спектрографа с ходом траекторий пучков заряженных частиц различных энергий схематически представлено на рис. 1, где 1 — внешний цилиндрический дискретный электрод радиуса  $R_a$ , 2 — внутренний цилиндрический электрод радиуса  $R$ , соединенный с плоскими торцевыми электродами 3, 4. Цифрой 5 обозначен исследуемый объект (источник вторичных электронов), 6 — источник первичного излучения. Детектором служат ПЧД, который следует располагать на внутреннем цилиндрическом электроде. При необходимости детектирования дискретных величин энергий значительно проще использовать плоские электроды 7, установленные перпендикулярно продольной оси системы и соединенные изолирующими трубками в единую конструкцию типа этажерки.

Для того чтобы в апертуру спектрографа попадали частицы как можно больших энергий, он должен



**Рис. 1.** Схема цилиндрического спектрографа с закрытыми торцами и ход траекторий пучков заряженных частиц с вынесенным за пределы поля исследуемым объектом при фокусировке на внутренний цилиндрический электрод для энергий, последовательно равных  $E/E_1 = 1, 5, 15, 25, 50$ .



**Рис. 2.** Зависимость основных параметров цилиндрического спектрографа от регистрируемых энергий: кривая 1 — положение точек фокусировки  $z_f/R$ , 2 — величина линейной дисперсии по энергии  $D/R$ , 3 — разрешение спектрографа  $\rho$ . *a* — диапазон энергий  $E_{\max}/E_{\min} = 25$ , *b* — диапазон энергий  $E_{\max}/E_{\min} = 50$ .

иметь достаточное расстояние между коаксиальными цилиндрами ( $R_a - R$ ). После целого ряда расчетов соотношение между радиусами внешнего и внутреннего цилиндров выбрано  $R_a/R = 7$ . При этом для достижения широкого диапазона одновременно регистрируемых энергий продольный размер системы оказывается лишь в 2 раза больше поперечного —  $L = 24.5R$ . Для возможности осуществления геометрически подобных систем здесь и в дальнейшем все геометрические параметры выражены в единицах радиуса внутреннего цилиндра  $R$ . Дискретный цилиндрический электрод разбит на 14 равных частей длиной  $l_n = 1.5R$  с одинаковыми промежутками  $s_n = 0.25R$ . Расстояние от передней стенки спектрографа до середины первой части равно  $z_1 = R$ . При этом величины потенциалов на частях дискретного электрода, возрастающие по линейному закону, равны  $V_n = V_1(z_n/z_1) = V_1[1 + 1.75(n - 1)]$ , где  $V_1$  — потенциал на первой части разрезного электрода,  $n$  — порядковый номер соответствующей части.

Для выбранной геометрии спектрографа сила, при которой осуществляется фокусировка пучков заряженных частиц различных энергий, определялась по двум независимым параметрам — положению объекта, вынесенного за пределы поля, и по углу наклона центральной траектории пучков на входе в систему относительно ее продольной оси. Определены параметры для двух режимов работы: первый — с диапазоном параллельно регистрируемых энергий  $E_{\max}/E_{\min} = 25$ , второй — с  $E_{\max}/E_{\min} = 50$ . Численные расчеты показали, что оптимальная (с точки зрения минимального размера изображения) фокусировка пучков различных энергий на внутренний цилиндрический электрод в обоих режимах осуществляется при впуске пучков через переднюю торцевую стенку системы вблизи внутреннего цилиндрического электрода. При источнике, вынесенном за пределы поля в точку с координатами  $r_i = 0$ ,  $z_i = -(2.2 \pm 0.05)R$ , для угла впуска центральной траектории пучка, равного  $\theta = (25.2^\circ \pm 0.2^\circ)$  при растворе пучка  $\alpha = \pm 0.5^\circ$ , фокусирующая сила, начиная с первой части разрезного цилиндра для минимальной энергии  $E_{\min} = E_1$ , равна  $F = eV_1/E_1 = 1.1$ . При этом пучки заряженных частиц в диапазоне энергий  $E_{\max}/E_{\min} = 25$  фокусируются на внутренний цилиндр, причем пучок с максимальной энергией занимает всю апертуру спектрографа. В той же геометрии спектрографа при  $F = 2.2$  достигается наибольший диапазон параллельно регистрируемых энергий, равный 50. На рис. 1 даны траектории пучков с разбросом по энергии  $E_{\max}/E_{\min} = 50$  в описанном выше оптимальном режиме работы.

На рис. 2, *a, b* представлены основные параметры спектрографа в первом и втором режимах работы — положение точек фокусировки на внутреннем цилиндре, величина линейной дисперсии по энергии, а также разрешение по энергии  $\rho = \Delta E/E$ . Из рисунков видно, что разрешение предлагаемого спектрографа лежит в пределах  $\rho = (1.1 - 0.4)\%$ . В первом режиме оно лучше для малых и больших энергий, но хуже для средних, во втором режиме зависимость является монотонной — разрешение улучшается по мере роста энергии. Следует отметить, что в спектрографе из плоских электродов разрешение в том же диапазоне энергий примерно вдвое лучше [6], однако светосила цилиндрического спектрометра практически на 2 порядка выше.

Светосилу системы определяет телесный угол пучка, исходящего из точечного источника и проходящего без потерь через анализатор в выходную щель. Он равен  $\Omega = (\alpha \cdot \gamma/\pi)100\%$ , где  $\alpha$  и  $\gamma$  — полууглы раствора пучка в меридиональной и сагитальной плоскостях соответственно. Поскольку в спектрографе с плоскими электродами в плоскости дисперсии полуугол раствора пучка равен  $\pm\alpha = 1^\circ$ , а в перпендикулярной плоскости из-за отсутствия фокусировки он не превышает  $\gamma = \pm 1^\circ$ , телесный угол пучка равен  $\Omega = 1.0 \cdot 10^{-2}\%$  (см. [6]). В предлагаемом цилиндрическом спектрографе с торцевыми электродами величина телесного угла сфокусированного пучка составляет  $\Omega = 0.44\%$ , так как  $\alpha = 0.5^\circ$ ,

$\gamma = 90^\circ$ . Таким образом, светосила исследованного цилиндрического спектрографа более чем в 40 раз превышает светосилу спектрографа с плоскими электродами.

## Заключение

Проведено компьютерное моделирование электростатического спектрографа из двух коаксиальных цилиндров с плоскими торцевыми электродами. Выявлены оптимальные режимы работы устройства при линейном законе распределения питающего напряжения на внешнем разрезном цилиндрическом электроде и заземленных внутреннем, а также торцевых электродах. При вынесенном за пределы поля объекте исследования рассчитаны основные параметры в двух оптимальных режимах работы с диапазонами параллельно регистрируемых энергий в пределах  $E_{\max}/E_{\min} = 25$  и  $E_{\max}/E_{\min} = 50$ . Оказалось, что разрешение по энергии в этих режимах не хуже одного процента, а светосила при аналогичной геометрии и равных диапазонах одновременно регистрируемых энергий в несколько десятков раз превосходит светосилу спектрографов на плоских электродах.

## Список литературы

- [1] Iriki Y., Kikuchi Y., Imai M., Itoh A. // Phys. Rev. A. 2011. Vol. 84. P. 052719.
- [2] Plekan O., Feyer V., Richter R., Coreno M., Prince K.C. // Molecular Phys. 2008. Vol. 106. N 9–10. P. 1143–1153.
- [3] Read F.H. // Rev. Sci. Instr. 2002. Vol. 73. N 3. P. 1129–1139.
- [4] Баранова Л.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 85.
- [5] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 6. С. 156.
- [6] Фишкова Т.Я. // ПФ. 2015. № 2, С. 101.