

Электростатический спектрограф в виде усеченного цилиндра

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: L.Ovsyannikova@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 15 февраля 2001 г.)

Рассчитан электростатический спектрограф на основе энергоанализатора типа усеченный цилиндр в широком диапазоне изменения его параметров. Найдено положение линии фокусов при энергетическом разбросе в пучке, отличающемся на порядок. Определены линейная и удельная дисперсии по энергии. Проведено сравнение с широко распространенным спектрографом из двух плоских электродов.

Для определения энергетического спектра пучков заряженных частиц, как правило, используется плоский конденсатор. Спектрографы на его основе находят широкое применение для определения спектров электронов, в частности при изучении потоков ионов и атомов, испускаемых горячей плазмой (см., например, [1]). При работе конденсатора в зеркальном режиме с углом впуска центральной траектории пучка, равным 45° , в плоскости дисперсии осуществляется фокусировка по углу первого порядка при условии, что источник и детекторы расположены на нижней пластине конденсатора [2]. Недостатками плоского конденсатора являются, во-первых, отсутствие фокусировки в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии, во-вторых, необходимость размещать приемники непосредственно на пластине конденсатора, в-третьих, открытый с боков плоский конденсатор имеет собственное поле рассеяния и не защищен от проникновения посторонних полей.

От перечисленных недостатков свободен, в частности, зеркальный анализатор типа "усеченный цилиндр" [3]. Целью настоящей работы являются расчет такого устройства в режиме спектрографа (рис. 1) и сравнение его параметров с параметрами плоского конденсатора. Расчет был проведен с использованием формул работы [3]. При этом выражение для распределения потенциала в пространстве между плоским и цилиндрическим электродами в двумерном приближении было записано в ином более удобном виде

$$\phi(x, y) = V/b\{\pi/2 - \arctg[(a^2 - x^2 - y^2)/(2ax)]\},$$

$$a = \sqrt{p(2-p)} \quad b = \pi/2 - \arctg[(1-p)/a], \quad (1)$$

где V — разность потенциалов между электродами, p — расстояние между ними по нормали (высота сегмента).

Здесь и в дальнейшем p , x , y и другие геометрические параметры выражены в единицах радиуса кривизны цилиндрического электрода R . Отметим, что в [3] выражение для коэффициента пропорциональности b , ответственного за величину разности потенциалов между электродами, написано ошибочно. Тем не менее это не влияет на вид формул, полученных в цитируемой работе. Однако значения параметров, вычисленные при высоте

сегмента p , следует относить к анализатору с высотой сегмента, равной $(2-p)$.

Расчет энергоанализатора на основе усеченного цилиндра в режиме спектрографа проведен в широком диапазоне изменения его геометрических размеров $0.2 \leq p/R \leq 1.8$ при изменении энергии пучка заряженных частиц на порядок. При этом, как и в случае плоского зеркала, угол входа центральной траектории пучка берется равным $\theta_0 = 45^\circ$, а источник располагается на плоском заземленном электроде. Рассчитаны режимы с фокусировкой первого порядка в плоскости дисперсии. Для этого случая на рис. 2 приведены расстояния между входом в поле центральных траекторий пучков с различными энергиями и выходом их из поля d_i (i — номер канала), а также кратчайшие расстояния от плоского электрода до места расположения детекторов h_i в зависимости от силы электростатического поля eV/ε (e и ε — заряд и энергия частиц соответственно). Эти расстояния растут с увеличением высоты сегмента. При уменьшении энергии они сильно уменьшаются и, начиная с $eV/\varepsilon \approx 3$, точка фокусировки пучка попадает на плоский электрод спектрографа.

Коэффициент линейной дисперсии по энергии всех электростатических анализаторов в режиме с фокусировкой по углу равен $D = L/(2 \cos^2 \theta_0)$ [4], где L — база анализатора (расстояние от источника до приемника). Поэтому при угле впуска $\theta_0 = 45^\circ$ он равен $D_i = L_i = d_i + h_i$.

Для оценки удельной дисперсии, которая является мерой разрешающей способности и определяется как величина линейной дисперсии, отнесенная к старшему абберационному члену, были рассчитаны коэффициенты аббераций второго порядка в плоскости дисперсии. Для усеченного цилиндра они равны

$$C_2/R = 3/2[(h_0 + h)(\text{ctg } \theta_0 - \text{tg } \theta_0)/\sin^2 \theta_0 - d \text{tg}^2 \theta_0]$$

$$- ab\varepsilon/(eV) \cos^3 \theta_0/\sin \theta_0 \{1 - 2[b\varepsilon/(eV) \sin \theta_0]^2\}$$

$$+ 8/a^3 [b\varepsilon/(eV)]^{5/2} \sin^2 \theta_0 \cos^3 \theta_0$$

$$\times \int_0^{x_m} x(2a^2 + 3x^2) \sqrt{\arctg(x_m/a) - \arctg(x/a)} dx. \quad (2)$$

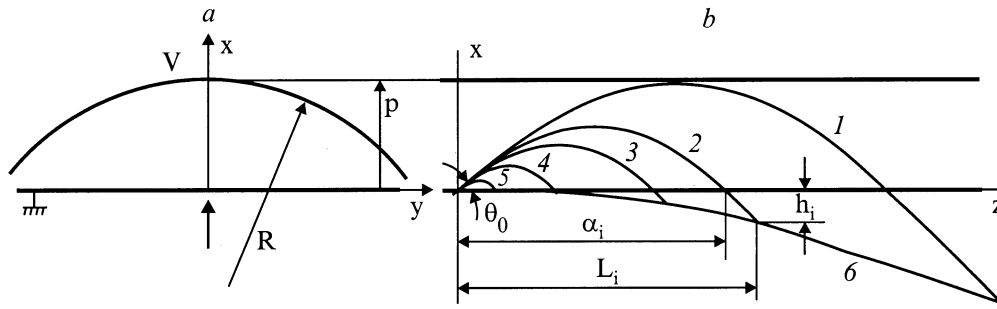


Рис. 1. Электростатический спектрограф заряженных частиц в виде усеченного цилиндра: *a* — поперечное сечение, *b* — плоскость дисперсии с ходом центральных траекторий пучка в усеченном цилиндре с высотой сегмента $p = 0.4R$ при изменении силы анализатора. eV/ε : 1 — 0.5, 2 — 0.75, 3 — 1.0, 4 — 2.0, 5 — 5.0, 6 — линия фокусов.

Формулы для L — расстояния между входом и выходом из поля центральной траектории пучка, $(h_0 + h)$ — суммы расстояний от источников и приемника до плоского электрода, а также величины x_m — координаты точки поворота центральной траектории даны в работе [3]. Максимальная энергия заряженных частиц, при которой точка поворота траектории оказывается на цилиндрическом электроде, не зависит от высоты сегмента и равна

$$\varepsilon_{\max} = eV / \sin^2 \theta_0. \quad (3)$$

При угле впуска $\theta_0 = 45^\circ$ "потолок" достигается при энергии $\varepsilon_{\max} = 2 \text{ eV}$, что соответствует силе анализатора $eV/\varepsilon = 0.5$.

На рис. 3 приведены абберационные коэффициенты, рассчитанные по формуле (2), для различной геометрии усеченного цилиндра. Здесь же приведены абберационные коэффициенты второго порядка плоского зеркала для случая, когда расстояние между электродами равно радиусу цилиндра. Отметим, что они имеют простой аналитический вид [2] $C_2 = 2dp/R$ (здесь p — расстояние между электродами). Из рисунка видно, что при высоте сегмента $p \geq R$ коэффициенты аббераций обращаются в нуль в области больших энергий, соответствующих силе анализатора $eV/\varepsilon \approx 0.7-1.1$. Однако зависимость их от энергии здесь очень резкая и при работе анализатора в режиме спектрографа в области энергии $\varepsilon = (2-0.5) \text{ eV}$ коэффициент аббераций в плоскости дисперсии достигает величин $C_2 = (100-10)R$. Поэтому при высоте сегмента, превышающем радиус цилиндра, анализатор можно использовать в режиме спектрографа только в узком диапазоне энергий пучка $\varepsilon \approx (0.5-0.2) \text{ eV}$. При этом величина максимального удаления траекторий от плоского электрода x_m существенно меньше p , т.е. апертура анализатора используется неэффективно.

Если размер сегмента усеченного цилиндра $p \leq 0.3R$, то мала величина расстояния линии фокусов от плоского электрода $0.01 \leq h_i/R \leq 0.1$ и величины энергий, регистрируемых детекторами, различаются между собой лишь в 2-3 раза.

На основании вышеизложенного выбран анализатор с максимальным расстоянием между цилиндрическим

и плоским электродами $p = 0.4R$. Для этой геометрии на рис. 1 представлены центральные траектории пучков в диапазоне энергий, отличающихся в десять раз (кривая 1 — сила анализатора $eV/\varepsilon = 0.5$, 2 — 0.75, 3 — 1.0, 4 — 2.0, 5 — 5.0). Кривая 6 — линия фокусов, на которой располагаются детекторы. Видно, что для больших энергий $\varepsilon = (2-0.4) \text{ eV}$ линия фокусов в отличие от плоского конденсатора находится вне поля.

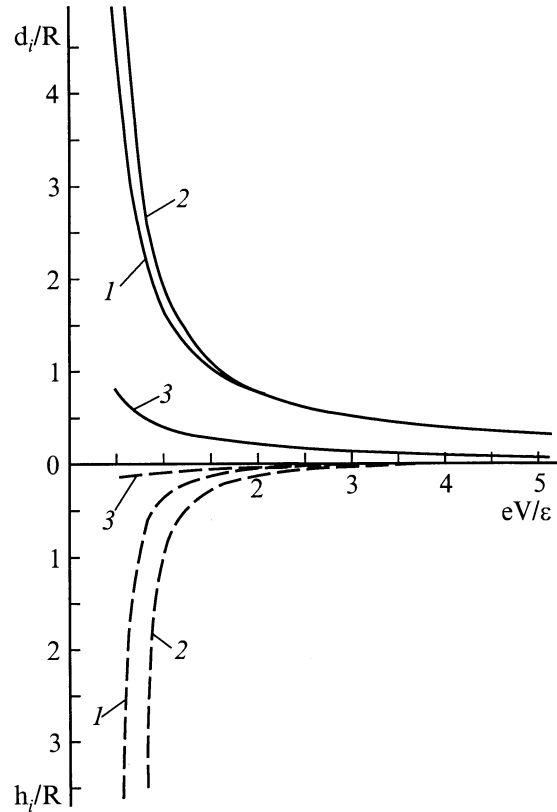


Рис. 2. Расстояния между входом и выходом центральных траекторий пучка (сплошные кривые) и расстояния от детекторов до плоского электрода (штриховые линии) для различных энергий частиц при изменении размеров усеченного цилиндра: 1 — $p = R$, 2 — $1.8R$, 3 — $0.2R$.

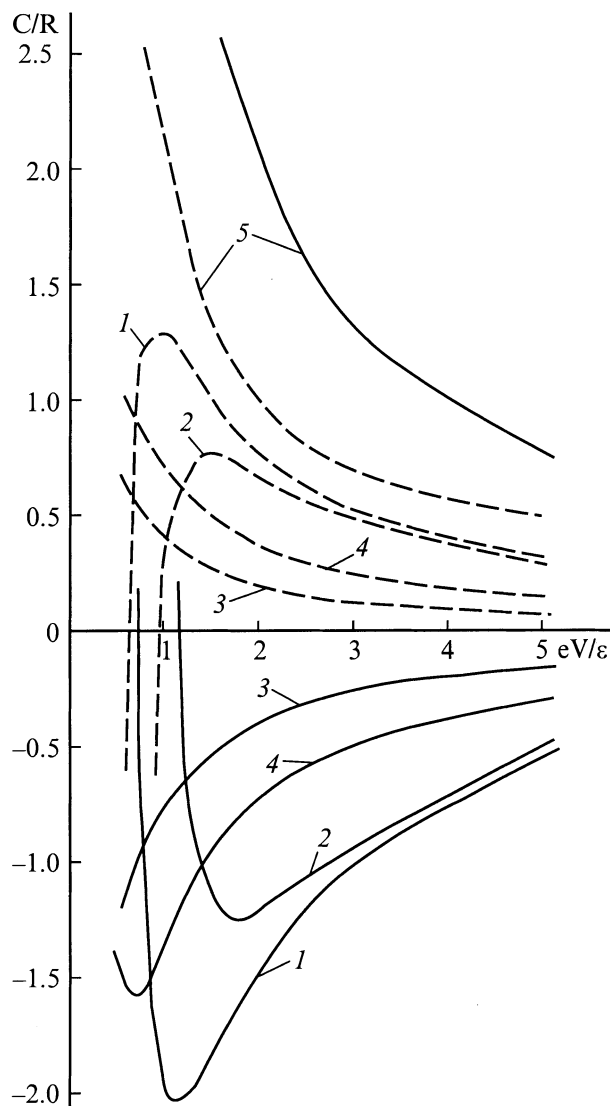


Рис. 3. Коэффициенты aberrаций в плоскости дисперсии (сплошные кривые) и коэффициенты, определяющие расширение пучка в вертикальной плоскости (штриховые кривые), в зависимости от силы анализатора для различных размеров усеченного цилиндра: 1 — $p = R$, 2 — $1.8R$, 3 — $0.2R$, 4 — $0.4R$, 5 относится к плоскому конденсатору.

Величины линейной дисперсии по энергии у обоих анализаторов практически одинаковы. Примерно равны также и удельные дисперсии $\delta = D/C_2$ в низкоэнергетических каналах. Однако в высокоэнергетических каналах $\varepsilon = (2-1) \text{ eV}$ удельная дисперсия "усеченного цилиндра" в 3–1.3 раза больше, чем у плоского зеркала, удельная дисперсия которого для всех каналов $\delta = 0.5$.

Известно, что у плоского зеркального анализатора отсутствует фокусировка в вертикальной плоскости (перпендикулярной плоскости дисперсии). Поэтому ширина изображения в фокусе такова: $\Delta y = C_\gamma \text{ tg } \gamma$, где $C_\gamma = d$, а γ — угол полураствора пучка в вертикальной плоскости.

Нами рассчитаны коэффициенты C_γ для анализатора типа "усеченный цилиндр" путем численного решения дифференциальных уравнений движения второго порядка, приведенных в работе [3]. Результаты этих расчетов даны на рис. 3 штриховыми кривыми. В области высоких энергий величины этих коэффициентов значительно меньше, чем у плоского зеркала. Это означает, что в вертикальной плоскости пучок подфокусируется. При низких энергиях этот эффект незначителен.

Следует отметить, что наличие фокусировки в вертикальной плоскости, а также меньший уровень aberrаций в плоскости дисперсии увеличивает светосилу спектрографа. Это особенно существенно при диагностике высокоэнергетических компонент горячей плазмы, поскольку интенсивность регистрируемых частиц быстро падает с ростом энергии. В результате повышается точность измерений энергетических спектров частиц в области высоких энергий.

Таким образом, в широком диапазоне изменения энергии пучка заряженных частиц рассчитан электростатический спектрограф на основе двухэлектродного устройства в виде усеченного цилиндра и обоснован выбор его оптимальной геометрии. Такой спектрограф имеет более низкий уровень aberrаций в плоскости дисперсии по сравнению с плоским конденсатором, а также обладает фокусирующим эффектом в вертикальной плоскости. Кроме того, исследованный в настоящей работе анализатор из плоского и цилиндрического электродов закрыт с боков, что исключает собственное поле рассеяния, а также проникновение посторонних полей.

Список литературы

- [1] Койдан В.С. // ПТЭ. 1971. № 3. С. 63–66. Извозчиков А.Б. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 157–163.
- [2] Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978. С. 54–58.
- [3] Фишкова Т.Я., Корищ И.А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 2. С. 367–371.
- [4] Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 7. С. 1358–1364.