

УДК 537.533.32

## ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ТИПА ДВУГРАННЫЙ УГОЛ С ПЛОСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Т. Я. Фишкова

Предложена упрощенная конструкция анализатора заряженных частиц по энергии типа двугранный угол, в котором второй электрод выполнен плоским. Определены диспергирующие и фокусирующие свойства такого анализатора в зеркальном режиме работы. Рассчитаны параметры, обеспечивающие фокусировку пучка второго и третьего порядков в плоскости дисперсии, а также пространственную фокусировку первого порядка. При фокусировке второго порядка определены режимы с максимальной линейной дисперсией по энергии. Найдена оптимальная геометрия анализатора и режим его работы, при которых осуществляются одновременно пространственная фокусировка и фокусировка третьего порядка в плоскости дисперсии. Проведено сравнение с аналогичным энергоанализатором с цилиндрической формой второго электрода.

Электростатические анализаторы заряженных частиц по энергии, один из электродов которых выполнен в виде двугранного угла величиной  $\psi = \pi/n$ , а второй — в виде части поверхности, образованной кривой  $n$  порядка, либо цилиндрической формы, предложены и рассчитаны в предыдущих работах автора [1-4]. Представляет интерес рассмотреть наиболее простой в конструктивном отношении анализатор с плоской формой второго электрода [3]. Поперечное сечение такого анализатора представляет собой равнобедренный треугольник с меняющейся величиной угла при вершине (рис. 1).

Распределение электростатического потенциала для такого устройства можно взять в том же виде, что и для анализатора типа двугранный угол с цилиндрической формой второго электрода (см. формулу (13) работы [4]). При этом в качестве второго электрода следует взять «плоскую» эквипотенциаль, координата которой в плоскости дисперсии  $a$  (расстояние от ребра двугранного угла) определяется из условия обращения в нуль вертикальной составляющей поля

$$E_{yn} = \frac{4V}{\pi r} n \frac{[n-1 - (n+1)x^{2n}]}{(1+x^{2n})^2} x^{n-2}y. \quad (1)$$

Из (1) имеем

$$E_{yn} = 0 \text{ при } a/r = \sqrt[n]{(n-1)/(n+1)}, \quad (2)$$

где  $V$ ,  $r$  — разность потенциалов и расстояние между электродами в виде двугранного угла и цилиндрическим. Здесь и в дальнейшем координаты  $x$  и  $y$  выражены в единицах  $r$ . Подставив полученное в выражение для потенциала в плоскости дисперсии (т. е. при  $y=0$ ), найдем величину потенциала плоской эквипотенциали  $V_0$

$$V_0 = \frac{4V}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}. \quad (3)$$

Расчеты координаты  $x$  плоской эквипотенциали по мере удаления от плоскости дисперсии, т. е. с ростом координаты  $y$ , показали, что ее отличие от  $a$   $\Delta x = (a-x)$  растет, достигая максимума при  $y_{\max} = a \operatorname{tg} \psi/2$ , и  $\Delta x$  уменьшается с возрастанием показателя роста поля « $n$ » (кривая 2 на рис. 1, б, рассчитанная

при значениях  $y = y_{\max}/2$ , которые приведены на кривой 3). Углы раствора пучка в вертикальной плоскости относительно плоскости дисперсии у рассматриваемых анализаторов, как правило, не превышают  $\pm(3-5)^\circ$ , т. е.  $y_{\max} \leq 0.2a$ . Расчеты показали, что в этой области  $\Delta x \leq 5 \cdot 10^{-3}a$ . Таким образом, эквипотенциаль, отстоящая от ребра двугранного угла на величину  $a$ , является с хорошей точностью плоской, а совмещение с ней второго электрода энергоанализатора обеспечивает возможность аналитических расчетов его основных параметров.

Параметры рассматриваемого анализатора в плоскости дисперсии определялись в соответствии с общими выражениями для параметров двухэлектродных энергоанализаторов с двумерным полем в зеркальном режиме работы, полученными в работе [4]. При впуске пучка заряженных частиц через плоский электрод  $x_0 = a$ ,  $x'_0 = \text{tg } \theta_0$  ( $\theta_0$  — угол входа в поле центральной траектории пучка) расстояние между входом и выходом центральной траектории  $z_m$ , суммарное

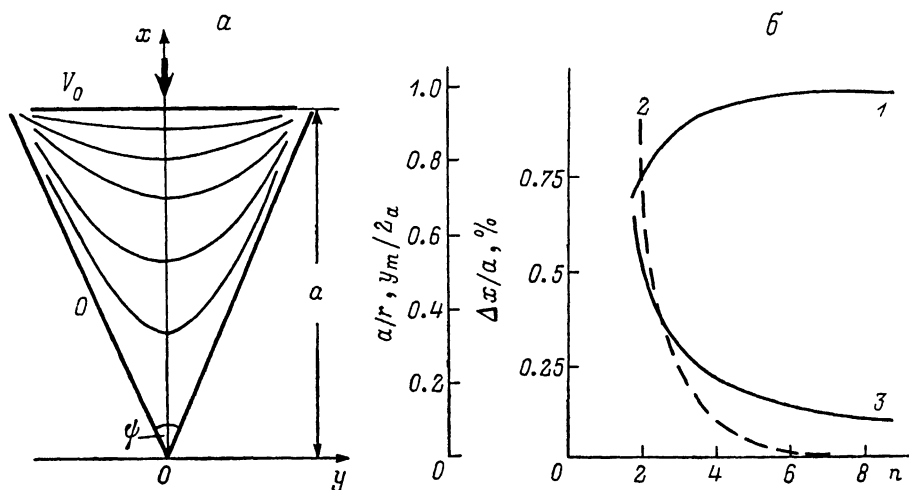


Рис. 1. Поперечное сечение анализатора типа двугранный угол (а) и зависимости координат плоского электрода от показателя роста поля (б).

1 —  $a/r$ , 2 —  $\Delta x/a$ , 3 —  $y_{\max}/2a$ .

расстояние от источника и приемника до плоского электрода ( $h+g$ ), обеспечивающее фокусировку первого порядка по углу, а также коэффициент абберации второго порядка  $C_2$  в плоскости дисперсии имеют вид, аналогичный формулам (15)—(18) работы [4], и поэтому здесь не приводятся. При этом верхний предел интегрирования в формулах (15)—(17) следует брать равным  $a$ , вместо угла  $\pi/4$  ставить  $\text{arctg } a^n$ . Параметр  $t$ , характеризующий силу энергоанализатора, равен  $t = V_0/\Phi$ , где  $V_0$  — разность потенциалов между плоским электродом и двугранным углом, оказывающая тормозящее действие на частицы;  $\Phi$  — ускоряющий потенциал на выходе из источника.

Для двугранных углов величиной  $100^\circ > \phi > 20^\circ$ , что соответствует изменению показателя роста поля  $n$  в пределах  $1.8 < n < 9$ , были рассчитаны на ЭВМ параметры  $z_m$ ,  $h=g$  и  $C_2$  в широком диапазоне изменения силы энергоанализатора  $r$  и входного угла  $\theta_0$  при фокусировке первого порядка по углу раствора пучка  $a$  в плоскости дисперсии. В дальнейшем были отобраны лишь режимы с фокусировкой второго порядка ( $C_2=0$ ).

На рис. 2 представлены такие режимы в виде зависимостей углов входа в поле центральной траектории пучка от силы энергоанализаторов для различных показателей роста поля (сплошные кривые 1—8). Обрыв кривых 1—4 при больших углах входа связан с тем обстоятельством, что расстояния от источника (приемника) до плоского электрода становятся равными нулю ( $h=g=0$ ) и дальнейшее увеличение угла входа приводит к случаю  $h=g < 0$ , т. е. к необходимости располагать источник и приемник в поле анализатора, что неприемлемо на практике.

Для нахождения условий пространственной фокусировки решалась численно на ЭВМ система дифференциальных уравнений для проекций траектории на плоскость дисперсии и вертикальную плоскость, аналогичная системе (19) работы [4], со следующими начальными условиями:

$$x_0 = a, y_0 = h \operatorname{ctg} \theta_0 \sin \gamma, z_0 = -z_m/2, y'_0 = \operatorname{tg} \gamma = 0.01.$$

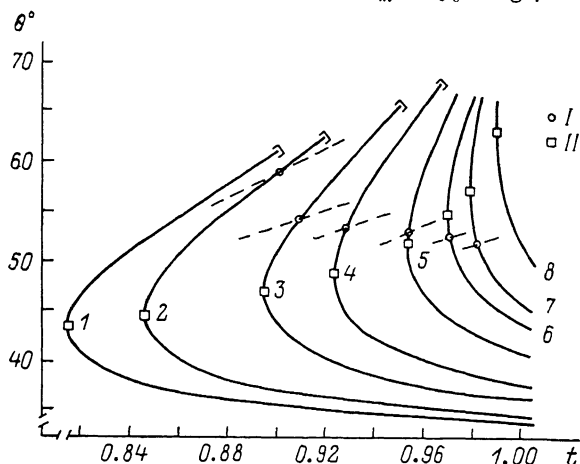


Рис. 2. Зависимости углов входа центральной траектории пучка от силы анализатора, обеспечивающих фокусировку второго порядка в плоскости дисперсии (сплошные кривые I—8) и пространственную фокусировку первого порядка (штриховые кривые) для двугранных углов, равных  $\psi = 100$  (I), 90 (2), 72 (3), 60 (4), 45 (5), 36 (6), 30 (7) и 20° (8).

Пространственная фокусировка первого порядка осуществляется при условии, что в точке поворота траектории при  $z=0$  и  $x=x_m$  углы наклона проекций траектории на плоскость дисперсии и вертикальную плоскость одновременно обращаются в нуль ( $x'=y'=0$ ).

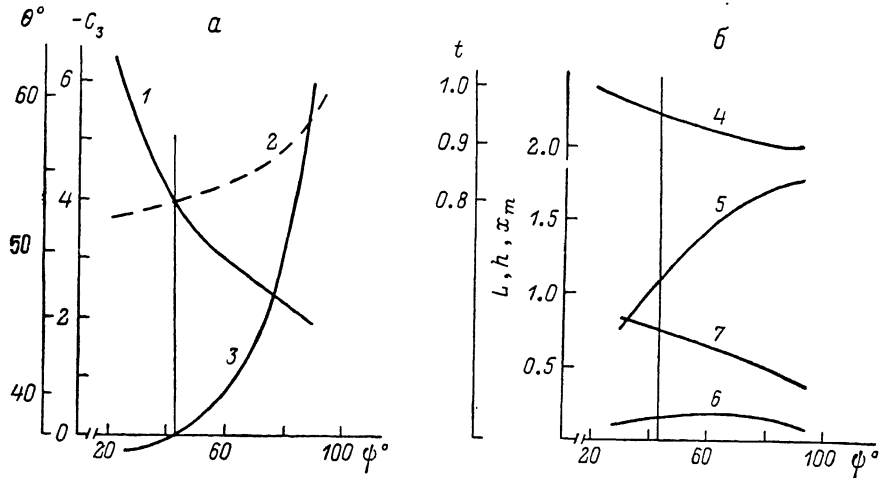


Рис. 3. Параметры энергоанализатора в режиме с пространственной фокусировкой при фокусировке второго порядка в плоскости дисперсии.

1 — углы входа, обеспечивающие фокусировку третьего порядка в плоскости дисперсии; 2 — углы входа центральной траектории  $\theta_0$ ; 3 — коэффициент абберации третьего порядка  $C_3$ ; 4 — сила анализатора  $t$ ; 5, 6 — расстояния от источника до приемника (L) и от источника (приемника) до плоского электрода  $h$ ; 7 — координата точки поворота центральной траектории в плоскости дисперсии  $x_m$ .

Углы входа в поле, обеспечивающие пространственную фокусировку, в зависимости от силы анализатора показаны на рис. 2 штриховыми линиями. Точки I пересечения этих линий со сплошными кривыми определяют наиболее интересные режимы работы анализаторов с пространственной фокусировкой при наличии фокусировки второго порядка в плоскости дисперсии. Другие

интересные режимы, отмеченные точками II на сплошных кривых, относятся к режимам с фокусировкой третьего порядка в плоскости дисперсии ( $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ ).

Для режимов с пространственной фокусировкой при фокусировке второго порядка в плоскости дисперсии на рис. 3 приведены основные параметры энергоанализаторов в зависимости от величины двугранных углов. Все линейные размеры на рис. 3, 4 выражены в единицах  $a$ . Кривая 1 дает величину угла входа, при котором достигается фокусировка третьего порядка по углу раствора пучка в плоскости дисперсии. Точка пересечения кривых 1 и 2 определяет оптимальный режим работы энергоанализатора, для которого осуществляется пространственная фокусировка при одновременной фокусировке третьего порядка по углу в плоскости дисперсии  $C_3 = 0$  (кривая 3).

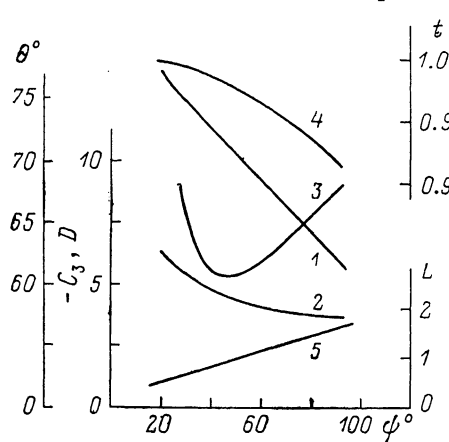


Рис. 4. Параметры энергоанализатора в режиме с максимальной дисперсией при фокусировке второго порядка.

1 — углы входа центральной траектории  $\theta_0$ ,  
2 — линейная дисперсия по энергии  $D$ .  
Остальные обозначения те же, что и на рис. 3.

Оптимальный режим имеет место в анализаторе с двугранным углом величиной  $\phi_0 = 42.9^\circ$  и с плоским электродом, отстоящим от ребра двугранного угла на величину  $a_0 = 0.944a$ . Расстояние между источником и приемником при этом  $L_0 = 1.08a_0$ , оси источника и приемника образуют с продольной осью анализатора угол  $|\theta_0| = 52.8^\circ$ , а сами они отстоят от плоского электрода на расстояние  $h_0 = g_0 = 0.141a_0$  по нормали; сила энергоанализатора  $t_0 = 0.958$ , его относительная дисперсия  $D_0 = D/L_0 = 1/2 \cos^2 \theta_0 = 1.37$ .

Были определены также параметры анализатора в режимах с максимальной возможной линейной дисперсией по энергии. Расчеты показали, что при фо-

кусовке второго порядка в плоскости дисперсии источник и приемник пучка заряженных частиц должны располагаться непосредственно на плоском электроде ( $h = g = 0$ ). Остальные параметры для этих режимов приведены на рис. 4 в зависимости от величины двугранного угла. С возрастанием показателя роста поля, что соответствует уменьшению величины двугранного угла, линейная дисперсия увеличивается, а база анализатора (расстояние между источником

и приемником) уменьшается.

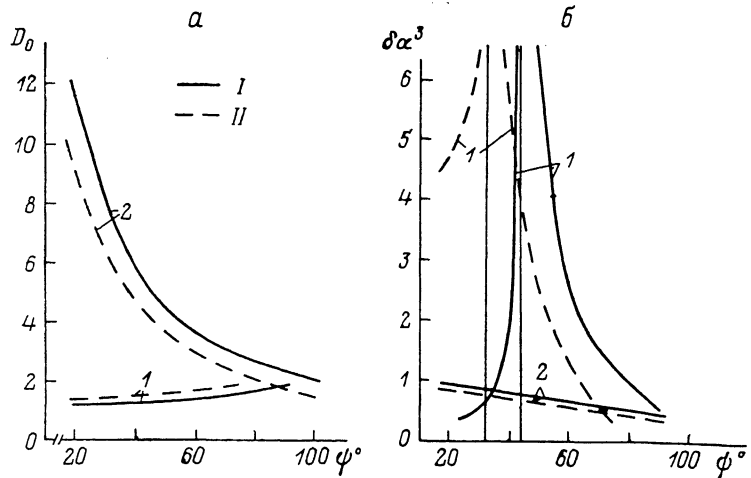


Рис. 5. Зависимости относительной (а) и удельной (б) дисперсии от величины двугранного угла.

и приемником) уменьшается.

и приемником) уменьшается, поэтому относительная дисперсия по энергии сильно растет и при  $n=9$  ( $\psi=20^\circ$ ) достигает  $D_0=11.6$ .

Сравним параметры энергоанализаторов типа двугранный угол с цилиндрическим и плоским электродами. На рис. 5 приведены величины относительно  $D_0$  (а) и удельной  $\delta$  (б) дисперсий. Относительная дисперсия характеризует способность анализаторов разделять пучки заряженных частиц по энергии и определяется линейной дисперсией в единицах характерного размера анализатора, за который обычно принимается база анализатора. Удельная дисперсия характеризует способность анализатора разрешать пучки, исходящие из источника малых размеров, и определяется как отношение дисперсии к главному абберационному члену. Для случая  $C_1=C_2=0$   $\delta=D/C_3\alpha^3$ . Кривые 1 (рис. 5) относятся к режимам с пространственной фокусировкой при фокусировке второго порядка в плоскости дисперсии, 2 — к режимам с максимальной дисперсией для каждого двугранного угла также при фокусировке второго порядка. Сплошные кривые относятся к анализатору с плоским электродом, штриховые — с цилиндрическим. Из этого рисунка видно, что величины относительной и удельной дисперсии обоих анализаторов близки друг другу. Однако удельная дисперсия в оптимальных режимах работы анализаторов достигает своих максимальных значений при разных величинах двугранного угла; так, в случае цилиндрического электрода  $\phi_0=32.0^\circ$ , в случае плоского —  $\phi_0=42.9^\circ$ . При этом углы входа в поле центральной траектории для обоих анализаторов примерно одинаковы:  $\theta_0=54.2^\circ$  для цилиндрического электрода,  $\theta_0=52.8^\circ$  — для плоского, поэтому относительная дисперсия последнего в оптимальном режиме с пространственной фокусировкой при фокусировке третьего порядка в плоскости дисперсии лишь на 7 % меньше.

Таким образом, для энергоанализаторов типа двугранный угол с упрощенной формой второго электрода в виде плоской или цилиндрической поверхности имеются широкие возможности выбора конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих достижение высокой удельной либо относительной дисперсии. По этим основным для анализаторов параметрам предложенные устройства превосходят такие широко используемые энергоанализаторы зеркального типа, как плоское и цилиндрическое зеркала, а также гиперболическое зеркало, коробчатый анализатор, анализатор в виде усеченного цилиндра и другие.

#### Литература

- [1] Фишкова Т. Я. А. с. 865049. — Оpubл. в Б. И., 1982, № 14, с. 325.
- [2] Фишкова Т. Я. ЖТФ, 1983, т. 53, № 10, с. 2071—2080.
- [3] Фишкова Т. Я. А. с. 1275587. — Оpubл. в Б. И., 1986, № 45, с. 212.
- [4] Фишкова Т. Я. ЖТФ, 1987, т. 57, № 7, с. 1358—1364.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
2 апреля 1987 г.