

01; 10

## СПРЯМЛЕНИЕ ЛИНИИ ФОКУСОВ В МНОГОКАСКАДНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

*В. В. Заиквара, Б. У. Ашимбаева*

Установлены условия спрямления линии фокусов в энергоанализаторе из нескольких электростатических цилиндрических зеркал с внутренним и внешним отражениями пучка заряженных частиц. Найдены схемы, допускающие спрямление линии фокусов вдоль оси симметрии системы, что позволяет в реальном спектрографе применить для регистрации микроканальную пластину.

Ранее нами была решена электронно-оптическая задача о спрямлении линии фокусов и переводе в режим спектрографа электростатического энергоанализатора, состоящего из двух последовательно расположенных цилиндрических зеркал (ЦЗ) с внешним и внутренним отражениями пучка заряженных частиц [1].

Цель настоящей работы — обобщить результаты [1] и показать, что многокаскадная система из ЦЗ обладает более высокими электронно-оптическими характеристиками, допуская спрямление линии фокусов вдоль оси симметрии системы, что позволяет в режиме спектрографа на практике использовать для регистрации конечных энергетических интервалов микроканальную пластину в форме полосы.

Схема многокаскадного ЦЗ с внутренним и внешним отражениями пучка представлена на рис. 1. Анализатор состоит из трех коаксиальных цилиндрических электродов: внешнего, среднего и внутреннего (радиусами  $r_1, r_0, r_2$ ), на внешний и внутренний электроды подаются отклоняющие потенциалы. Пучок заряженных частиц, выходящий под углом  $\alpha$  к оси симметрии зеркала (на рис. 1 показана только осевая траектория пучка) из кольцевого источника, расположенного во внутренней области среднего цилиндрического электрода на расстоянии  $\Delta_1$  от его поверхности, проходя через систему, многократно отражается в каскадах ЦЗ и фокусируется, формируя в общем случае кольцевое изображение, удаленное на расстояние  $\Delta_2$  от поверхности среднего электрода. Все линейные размеры мы представляем в единицах радиуса среднего цилиндрического электрода.

Исходным для исследования электронно-оптических свойств системы является выражение для длины проекции траектории от источника до его изображения, определяемой суммой проекций траекторий в каскадах ЦЗ,

$$l = \operatorname{ctg} \alpha [\Delta + 4(n\rho\theta + mp_1\theta_1)], \quad (1)$$

где  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$  — суммарная удаленность источника и изображения от поверхности среднего электрода;  $n, m$  — число каскадов внутреннего и внешнего отражений соответственно;  $\rho, \theta$  и  $P_1, \theta_1$  — параметры отражения, характеризующие ЦЗ [1].

Введем обозначения для функций, используемых в дальнейшем,

$$a = \theta + p(1 + 2p\theta), \quad a_1 = \theta_1 + p_1(1 - 2p_1\theta_1), \quad (2)$$

$$b = p^2(1 + 2p\theta), \quad b_1 = p_1^2(1 - 2p_1\theta_1). \quad (3)$$

Первым требованием, налагаемым на систему, является выполнение угловой фокусировки пучка. Возьмем первую производную от  $l$  (1) по  $z$

$$\frac{dl}{dz} = -\Delta(1 + \text{ctg}^2 \alpha) - 4(np\theta + mp_1\theta_1) + 4\text{ctg}^2 \alpha (nb + mb_1), \quad (4)$$

приравняв (4) нулю, приходим к условию угловой фокусировки первого порядка

$$\Delta(1 + \text{ctg}^2 \alpha) = -4(np\theta + mp_1\theta_1) + 4\text{ctg}^2 \alpha (nb + mb_1), \quad (5)$$

которое, будучи разрешенным относительно  $\text{ctg}^2 \alpha$  (5), принимает вид

$$\text{ctg}^2 \alpha = \frac{4(np\theta + mp_1\theta_1) + \Delta}{4(nb + mb_1) - \Delta}. \quad (6)$$

Вторым требованием является спрямление линии фокусов [1]. Условимся порядком спрямления линии фокусов именовать число производных от  $\Delta$  по  $z$

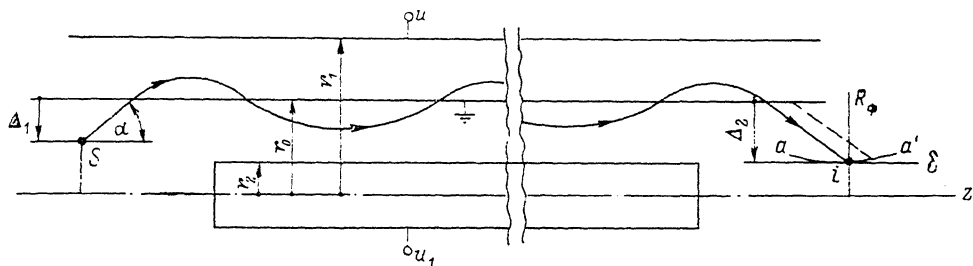


Рис. 1. Схема многокаскадного ЦЗ.

$s$  и  $i$  — кольцевые источник и изображение,  $aa'$  — линия фокусов.

( $z$  — текущая координата в направлении оси симметрии), одновременно обращающихся в нуль в условиях угловой фокусировки первого порядка. Производные берутся в точке пересечения линии фокусов с осевой траекторией главного пучка ( $\varepsilon=0$ ). Если коэффициент линейной дисперсии по энергии системы

$$A_2 = \frac{d\Delta}{d\varepsilon} = 2\text{ctg} \alpha (nra + mp_1a_1) \quad (7)$$

не равен нулю, то можно показать [2], что требование равенства нулю определенного числа производных ( $d^n \Delta / (dz^n)$ ) приводит к занулению такого же числа производных ( $d^n \Delta / (d\varepsilon^n)$ ).

Для отыскания  $(d\Delta)/(d\varepsilon)$  дифференцируем (5) по  $\varepsilon$

$$(1 + \text{ctg}^2 \alpha) \frac{d\Delta}{d\varepsilon} = -2(nra + mp_1a_1) + 4\text{ctg}^2 \alpha [n(b + p^3a) + m(b_1 - p_1^3a_1)]. \quad (8)$$

Приравняв  $d\Delta/d\varepsilon$  (8) нулю, находим условие спрямления линии фокусов первого порядка

$$\text{ctg}^2 \alpha = \frac{nra + mp_1a_1}{2[n(b + p^3a) + m(b_1 - p_1^3a_1)]}. \quad (9)$$

Исключим из системы уравнений (6), (9)  $\text{ctg}^2 \alpha$  и решим их относительно  $\Delta$ , тогда получим условие спрямления линии фокусов в системе зеркал, настроенной на режим угловой фокусировки первого порядка,

$$\Delta = 4 \frac{(nb + mb_1)^2 - (np\theta + mp_1\theta_1)(nb + mb_1 + 2np^3a - 2mp_1^3a_1)}{3(nb + mb_1) + 2(np^3a - mp_1^3a) + np\theta + mp_1\theta_1}. \quad (10)$$

Дифференцируя (8) по  $\varepsilon$ , найдем  $(d^2 \Delta)/(d\varepsilon^2)$

$$(1 + \text{ctg}^2 \alpha) \frac{d^2 \Delta}{d\varepsilon^2} = -(nra + mp_1a_1) - 2[n(b + p^3a) + m(b_1 - p_1^3a_1)] + 2[n(2b + 5p^3a) + m(2b_1 - 5p_1^3a_1) + f] \text{ctg}^2 \alpha, \quad (11)$$

где

$$f = 2np^2(b + p^3a) - 2mp_1^2(b_1 - p_1^3a_1).$$

Приравнивая  $(d^2\Delta)/(d\epsilon^2)$  в (11) нулю, получаем

$$\text{ctg}^2 \alpha = \frac{npa + mp_1a_1 + 2[n(b + p^3a) + m(b_1 - p_1^3a_1)]}{2[n(2b + 5p^3a) + m(2b_1 - 5p_1^3a_1)] + f}. \quad (12)$$

Для спрямления линии фокусов во втором порядке необходимо, чтобы совместно выполнялись условия (6), (9) и (12), что соответствует требованиям  $dl/d\alpha = d\Delta/d\epsilon = d^2\Delta/d\epsilon^2 = 0$ . Исключим  $\text{ctg}^2 \alpha$  из (6) и (12)

$$\begin{aligned} \Delta = 4 \{ & (nb + mb_1)[3(nb + mb_1) - 3(np^0 + mp_1^0) + 2(np^3a - mp_1^3a_1)] - \\ & - 2(np^0 + mp_1^0)[5(np^3a - mp_1^3a_1) + f] / [npa + mp_1a_1 + \\ & + 6(nb + mb_1) + 12(np^3a - mp_1^3a_1) + 2f]. \end{aligned} \quad (13)$$

Исключив  $\Delta$  из (10) и (13), придем к условию спрямления линии фокусов во втором порядке при сохранении угловой фокусировки первого порядка

$$2[n(b + p^3a) + m(b_1 - p_1^3a_1)]^2 - (npa + mp_1a_1)[nb + mb_1 + 4(np^3a - mp_1^3a_1) + f] = 0. \quad (14)$$

В случае многокаскадной системы уравнение линии фокусов в координатах  $R_\phi$  и  $\delta$  (рис. 1) имеет следующий вид:

$$R_\phi = 1 - \frac{4}{1 + \text{ctg}^2 \alpha} \{ \text{ctg}^2 \alpha (nb + mb_1) - np^0 - mp_1^0 \},$$

$$\delta = 4 \text{ctg} \alpha \{ np^0 + mp_1^0 - n p^{(0)\theta(0)} - m p_1^{(0)\theta(0)} \} - R_\phi \text{ctg} \alpha. \quad (15)$$

Параметры, отмеченные индексом нуль здесь и в других формулах, относятся к осевой траектории центрального пучка ( $\epsilon = 0$ ).

Рассмотрим, можно ли повысить качество угловой фокусировки пучков в режиме спрямления линии фокусов. В работе [2] было показано, что выбором параметров зеркал системы это в принципе невозможно сделать, поскольку требование спрямления линии фокусов несовместимо с требованием угловой фокусировки второго порядка. Квадратичную угловую aberrацию можно все же устранить, если на входе системы в анализируемом пучке создать локальную угловую дисперсию по энергии параболического типа

$$\epsilon = \frac{E - E_0}{E_0} = k(\Delta\alpha)^2, \quad (16)$$

где  $k$  — коэффициент угловой дисперсии,  $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ .

В случае локальной дисперсии (16) параметры отражения в каскадах ЦЗ внешнего и внутреннего отражений трансформируются следующим образом:

$$p \rightarrow p\sqrt{1 + k(\alpha - \alpha_0)^2}, \quad p_1 \rightarrow p_1\sqrt{1 + k(\alpha - \alpha_0)^2}. \quad (17)$$

Выражение для  $(dl)/(d\alpha)$  остается прежним (4), а  $(d^2l)/(d\alpha^2)$  теперь имеет вид

$$\frac{d^2l}{d\alpha^2} = \frac{d^2l}{d\alpha^2} \Big|_{k=0} + 4k(np^0 + mp_1^0) \text{ctg} \alpha, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d^2l}{d\alpha^2} \Big|_{k=0} = & 2 \text{ctg} \alpha [\Delta(1 + \text{ctg}^2 \alpha) - 2(npa + mp_1a_1) - \\ & - 4(nb + mb_1) + 4 \text{ctg}^2 \alpha (np^3a - mp_1^3a_1)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Налагая требование  $(d^2l)/(d\alpha^2) = 0$ , приходим к условию для выбора величины коэффициента дисперсии

$$k = - \frac{\frac{d^2 l}{d \alpha^2} \Big|_{k=0}}{4 \operatorname{ctg} \alpha_0 (n p a + m p_1 a_1)} = 2. \quad (20)$$

Как видно, величина коэффициента угловой дисперсии не зависит от структуры многокаскадной системы ЦЗ и равна двум. На практике создать в пучке локальную угловую дисперсию типа (16) можно, распределив потенциал на поверхности эмиттера по заданному закону. Например, если эмиттер имеет форму цилиндра радиуса  $\rho < 1$ , соосного системе, то распределение потенциала должно подчиняться следующей закономерности:

$$u = \frac{\varepsilon}{q} = \frac{2}{q} \left\{ \operatorname{arc} \sin \frac{\sin \alpha_0}{\sqrt{\left[ \frac{1-\rho}{|z| \cdot \sin \alpha_0} - \operatorname{sign}(z) \cos \alpha_0 \right]^2 + \sin^2 \alpha_0}} \right\}^2, \quad (21)$$

$q$  — заряд анализируемых частиц.

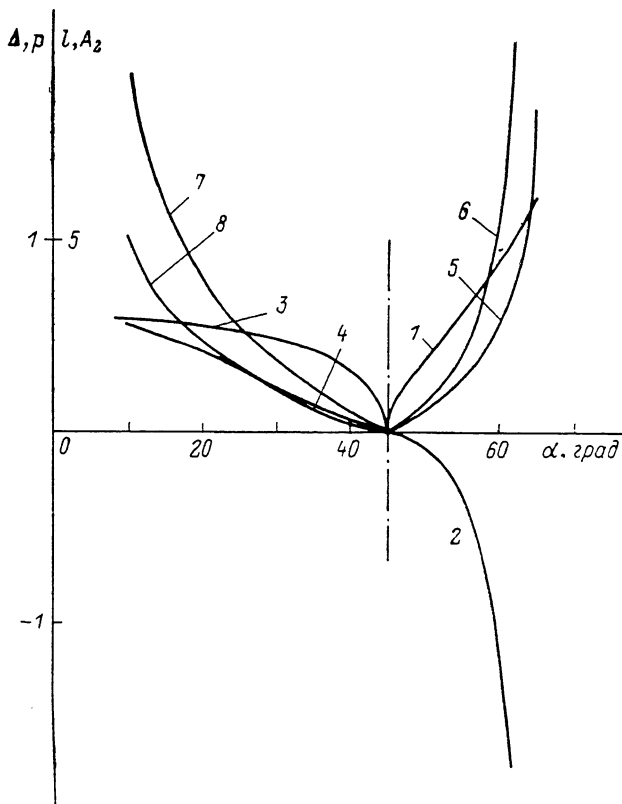


Рис. 2. Зависимость от  $\alpha$  параметров одиночного ЦЗ.

1 —  $p$ , 2 —  $\Delta^I$ , 3 —  $p_1$ , 4 —  $\Delta^{II}$ , 5 —  $l^I$ , 6 —  $A_2^I$ , 7 —  $l^{II}$ , 8 —  $A_2^{II}$ .

Начало отсчета координаты  $z$  находится на поверхности цилиндра в точке пересечения поверхности с осевой траекторией, наклоненной к оси симметрии под углом  $\alpha$ . Положительное направление  $z$  — к системе.

Приступим к анализу полученных нами данных расчета о режимах спрямления линии фокусов и электронно-оптических характеристиках системы с различным числом каскадов ЦЗ внешнего и внутреннего отражений  $n$  и  $m$ .

1. Одиночные зеркала. Полагая в (10)  $n=1, m=0$  или  $n=0, m=1$ , приходим к условиям спрямления линии фокусов в одиночных зеркалах с внутренним или внешним отражениями пучка. Для ЦЗ с внутренним отражением пучка  $n=1, m=0$

$$\Delta I = 4 \frac{b^2 - p\theta (b + 2p^3 a)}{3b + p\theta + 2p^3 a} \quad (22)$$

и для ЦЗ с внешним отражением  $n=0$ ,  $m=1$

$$\Delta II = 4 \frac{b_1^2 - p_1 \theta_1 (b_1 - 2p_1^2 a_1)}{3b_1 + p_1 \theta_1 - 2p_1^2 a_1}. \quad (23)$$

На рис. 2 приведены кривые зависимости функций  $p$ ,  $\Delta I$ ,  $p_1$ ,  $\Delta II$ ,  $l$  и  $A_2$  от входного угла  $\alpha$ , рассчитанные по формулам (6), (22), (23), (1) и (7). Из рис. 2

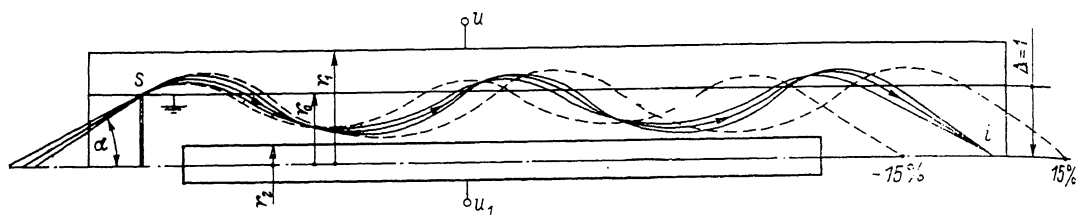


Рис. 3. Схема угловой фокусировки в системе  $n=3$ ,  $m=2$ ,  $\Delta=1$ .

Линия фокусов спрямлена вдоль оси симметрии.

следует, что в одиночном ЦЗ с внутренним отражением пучка условия спрямления линии фокусов осуществляются только в электронно-оптических схемах с мнимым источником ( $\Delta I < 0$ )  $\alpha > 45^\circ$ . В ЦЗ с внешним отражением спрямле-

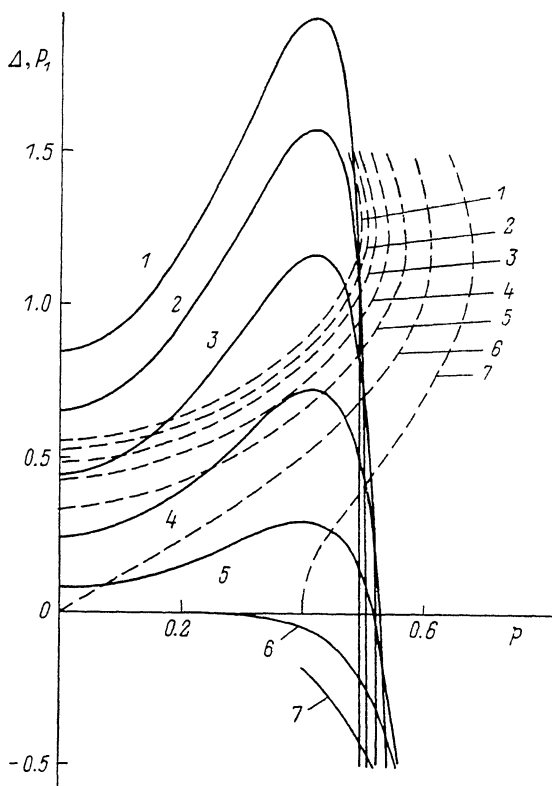


Рис. 4. Система  $n=3$ ,  $m=2$ .

$\Delta(p)$  — сплошные линии,  $p_1(p)$  — штриховые;  $\alpha$ , град: 1 — 20, 2 — 25, 3 — 30, 4 — 35, 5 — 40, 6 — 45, 7 — 50.

ние линии фокусов возможно лишь в схемах с  $p_1 < 0.6$  и  $\alpha < 45^\circ$ . При стремлении величины входного угла к  $45^\circ$  ( $\alpha \rightarrow 45^\circ$ ), значения параметров  $p$ ,  $\Delta I$ ,  $p_1$ ,  $\Delta II$  приближаются к нулю, причем так, что кривые  $\Delta I(\alpha)$ ,  $\Delta II(\alpha)$  соприкасаются с осью  $\alpha$ , а кривые  $p(\alpha)$  и  $p_1(\alpha)$  — с прямой, перпендикулярной к оси  $\alpha$ , в точке  $\alpha=45^\circ$ .

2. Системы зеркал. Расчеты условий спрямления линии фокусов в многокаскадных системах проводились для следующих схем:  $n=1, m=1; n=2, m=1; n=3, m=2$ . Схема многокаскадной системы  $n=3, m=2$  приведена на рис. 3. По формулам (6) и (10), выражающим условия  $(dl)/(d\alpha)=0, (d\Delta)/(d\epsilon)=0$ , для различных углов входа пучка заряженных частиц в систему зеркал  $\alpha=20-55^\circ$  были найдены функции  $\Delta(p), p_1(p), l(p)$  (1) и  $A_2(p)$  (7). На рис. 4 приведены графики  $\Delta(p)$  и  $p_1(p)$  для схемы  $n=3, m=2$ . Эти графики типичны, они хорошо передают особенности, свойственные  $\Delta(p)$  и  $p_1(p)$  остальным схемам. Из анализа графиков можно заключить, что условия спрямления линии фокусов осуществляются для множества электронно-оптических схем многокаскадных систем ЦЗ с широко варьируемым набором основных параметров  $\alpha, \Delta, p$  и  $p_1$ . Для всех типов многокаскадных систем кривые  $\Delta(p)$  ( $\alpha=45^\circ$ ) соприкасаются в точке  $p=0$  с осью абсцисс в четвертом порядке  $(d\Delta)/(dp)==(d^2\Delta)/(dp^2)=(d^3\Delta)/(dp^3)=0, (d^4\Delta)/(dp^4)\neq 0$ , наследуя особенность, присущую функциям  $\Delta$  и  $p$  в точке  $\alpha=45^\circ$  одиночных зеркал (рис. 2). Кривые  $\Delta(p)$  и  $p_1(p)$  для  $\alpha=45^\circ$  разграничивают две области ( $\alpha < 45^\circ, \alpha > 45^\circ$ ), в которых характер зависимости  $\Delta(p)$  и  $p_1(p)$  существенно отличается. В области  $\alpha < 45^\circ$  функции  $\Delta(p) > 0$  и  $p_1(p) > 0$  берут начало на оси ординат в точках, которым отвечают  $m$ -кратные значения  $\Delta(\alpha)$  и просто  $p(\alpha)$  для одиночного ЦЗ с внешним отражением; в окрестности  $p=0.4-0.5$  кривые  $\Delta(p)$  обнаруживают максимумы, соответствующие выполнению условия спрямления линии фокусов во втором порядке  $(dl)/(d\alpha)=(d\Delta)/(d\epsilon)=(d^2\Delta)/(d\epsilon^2)=0$ ; в интервале  $p=0.5-0.6$  кривые  $\Delta(p)$  пересекают ось абсцисс и уходят в область отрицательных значений. Для  $\alpha > 45^\circ$  решения  $\Delta(p)$  существуют только в области отрицательных значений (мнимый кольцевой источник). Для каждого  $\alpha$  существует предельное значение  $p_{\max}$ , для которого еще имеются решения уравнений (6) и (10), в окрестности  $p_{\max}$  функции  $\Delta(p), p_1(p), l$  и  $A_2$  двузначны, графики  $l$  и  $A_2$  для  $\alpha=30, 40$  и  $50^\circ$  представлены на рис. 5. Сравнение с одиночными ЦЗ (рис. 2) показывает существенное увеличение линейной дисперсии  $A_2$  (7) при переходе к многокаскадным системам ЦЗ. В табл. 1 приведены параметры трех схем, в которых осуществляется второй порядок спрямления линии фокусов  $(dl)/(d\alpha)==(d\Delta)/(d\epsilon)=(d^2\Delta)/(d\epsilon^2)=0$ , эти параметры были рассчитаны по формулам (6) и (11). В табл. 1 также приведены значения  $(d^3\Delta)/(d\epsilon^3)$ , определенные по формуле (24) работы [2].

Наиболее благоприятные условия для установления режимов спрямления линии фокусов многокаскадных систем осуществляются в области  $p \sim 0.4-$

Т а б л и ц а 1  
 $n=3, m=2$

$\alpha$ , град	$p$	$p_1$	$\Delta$	$l$	$A_2$	$\frac{d^3\Delta}{d\epsilon^3}$
20	0.41853	0.90971	1.94311	22.65393	12.82749	7.73422
25	0.42119	0.88236	1.57846	16.70615	10.16942	6.49493
30	0.42348	0.84125	1.16521	12.48634	8.32423	5.02573
35	0.42278	0.77634	0.72636	9.17823	6.83912	3.35084
40	0.40787	0.65987	0.29973	6.15092	5.24085	1.52709
$n=2, m=1$						
20	0.38712	0.92417	1.02041	11.94222	6.76213	3.95774
25	0.39066	0.89729	0.83259	8.84852	5.38628	3.33938
30	0.39435	0.85674	0.61878	6.66092	4.44061	2.60359
35	0.39598	0.79246	0.38938	4.95144	3.68954	1.75807
40	0.38539	0.67610	0.16403	3.38248	2.88202	0.82031
$n=1, m=1$						
20	0.46385	0.88918	0.90594	10.50434	5.94795	3.74146
25	0.46520	0.86132	0.73175	7.69922	4.68668	3.12182
30	0.46544	0.81960	0.53548	5.70171	3.80114	2.39129
35	0.46138	0.75414	0.32913	4.13125	3.07838	1.56777
40	0.44032	0.63784	0.13251	2.70129	2.30162	0.69264

0.5,  $\alpha < 45^\circ$ . Здесь для заданного угла ввода  $\alpha$  с увеличением числа каскадов  $n$  и  $m$  быстро возрастает  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$  — величина суммарного удаления источника и изображения, становится возможным выбор схем, допускающих спрямление линии фокусов вдоль оси симметрии. В этом случае для регистрации конечного энергетического интервала на практике можно использовать микроканальную пластину в форме полоски. В табл. 2 приведены электронно-оптиче-

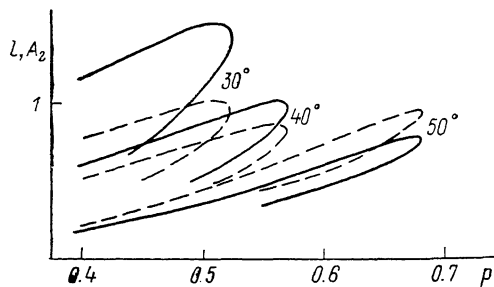


Рис. 5. Система  $n=3, m=2$ .

$l(p)$  — сплошные линии,  $A_2(p)$  — штриховые.

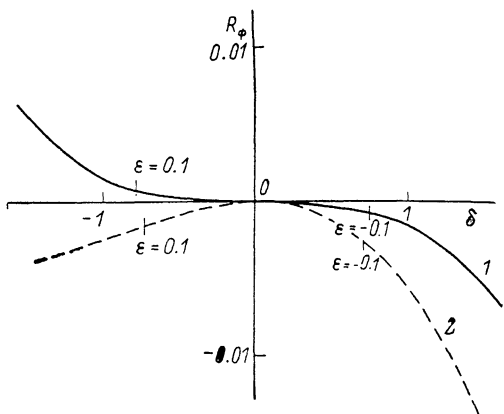


Рис. 6. Линии фокусов системы  $n=3, m=2, \Delta=1$ .  
1, 2 — второй и первый порядки спрямления соответственно.

ские характеристики многокаскадных систем для  $\Delta=1$  и 2. Величина параметра  $p$  выбрана равной 0.4.

На рис. 3 представлена схема фокусировки для случая  $n=3, m=2, \Delta_1=0, \Delta_2=1, \Delta=1$ . Источником является тонкое кольцо на поверхности среднего цилиндрического электрода. Фокусировка пучка осуществляется на оси симметрии системы. Параметры схемы выбраны, исходя из требования второго порядка спрямления линии фокусов  $(dl)/(d\alpha) = (d\Delta)/d\varepsilon = (d^2\Delta)/(d\varepsilon^2) = 0$ :  $\alpha = 31.899^\circ, p = 0.4238, p_1 = 0.8203, l = 11.1550, A_2 = 7.7384$ . Для этого случая по

Т а б л и ц а 2

$n$	$m$	$p$	$p_1$	$\alpha$ , град	$l$	$A_2$
2	1	0.4	0.9541	20.409	12.064	6.867
3	2	0.4	0.7790	31.734	10.402	7.190
4	3	0.4	0.7109	35.242	11.051	8.734
3	2	0.4	0.8776	18.881	23.184	12.948
4	3	0.4	0.7980	27.209	19.341	12.226

формулам (15) была рассчитана линия фокусов (рис. 6, кривая 1) и сопоставлена с линией фокусов (кривая 2) для схемы спрямления первого порядка ( $n=3, m=2, \Delta=1, p=0.4$ ) (табл. 2). Как видно, кривая 1 по форме близка к кубической параболе  $R_\phi = -0.00161\delta^3$ , что обеспечивает существенно лучшее по сравнению с кривой 2 качество спрямления линии фокусов в энергетическом интервале  $\varepsilon = \pm 10\%$ . В 2-м и 3-м столбцах табл. 3 в зависимости от  $\varepsilon$  представлены данные о продольном размытии изображения, вызванном аберрацией из-за угловой расходимости пучка  $\Delta\alpha = \pm 2$  и  $\pm 4^\circ$  в различных точках оси симметрии вблизи спрямленной линии фокусов. Размытие задается величиной  $\Delta l = l(\varepsilon, \Delta\alpha) - l(\varepsilon, 0)$ , рассчитанной для крайних траекторий пучка. Осевое раз-

Т а б л и ц а 3

$\alpha, \%$	$\Delta l (k=0)$		$\Delta l (k=2)$	
	$\Delta\alpha = \pm 2^\circ$	$\Delta\alpha = \pm 4^\circ$	$\Delta\alpha = \pm 2^\circ$	$\Delta\alpha = \pm 4^\circ$
-20	-0.01634	-0.06359	-0.00022	0.00050
	-0.01471	-0.05976	-0.00136	0.00383
-15	-0.01678	-0.06603	0.00003	0.00082
	-0.01618	-0.06497	0.00060	0.00151
-10	-0.01736	-0.06856	0.00014	0.00098
	-0.01734	-0.06941	0.00014	-0.00012
-5	-0.01800	-0.07107	0.00017	0.00117
	-0.01827	-0.07324	-0.00012	-0.00121
0	-0.01862	-0.07336	0.00020	0.00155
	-0.01904	-0.07661	-0.00023	-0.00190
5	-0.01915	-0.07530	0.00032	0.00228
	-0.01973	-0.07963	-0.00027	-0.00231
10	-0.01954	-0.07675	0.00059	0.00350
	-0.02040	-0.08245	-0.00030	-0.00256
15	-0.01970	-0.07758	0.00108	0.00534
	-0.02111	-0.08518	-0.00038	-0.00278
20	-0.01958	-0.07769	0.00184	0.00795
	-0.02192	-0.08794	-0.00057	-0.00306

мытие изображения уменьшается более чем на порядок, если создать локальную угловую дисперсию по энергии параболического типа в пучке, о чем свидетельствуют расчетные данные, приведенные в 4-м и 5-м столбцах табл. 3.

### Заключение

1. Решена электронно-оптическая задача о спрямлении линии фокусов в системе последовательно расположенных цилиндрических зеркал с  $n$  каскадами внутреннего отражения пучка и с  $m$  каскадами внешнего отражения. Установлено уравнение, которому должны удовлетворять параметры зеркал в соответствии с критерием равенства нулю тангенса угла наклона касательной в точке пересечения траекторий с линией фокусов.

2. Условия спрямления линии фокусов осуществляются для множества электронно-оптических схем многокаскадных систем ЦЗ с широко варьируемым набором параметров  $\alpha$ ,  $\Delta$ ,  $p$  и  $p_1$  при этом достигается существенный выигрыш в линейной дисперсии по энергии по сравнению с одиночным ЦЗ. Достигим второй порядок спрямления линии фокусов  $(dl)/(d\alpha) = (d\Delta)/(d\epsilon) = (d^2\Delta)/(d\epsilon^2) = 0$ . Условия спрямления линии фокусов несовместимы с требованием угловой фокусировки второго порядка в системе.

3. Введение локальной угловой дисперсии по энергии параболического типа в пучке позволяет на порядок улучшить угловую фокусировку в условиях спрямления линии фокусов, практически это можно осуществить, распределив потенциал на поверхности эмиттера по определенному закону.

4. Показано, что в области  $p \sim 0.4-0.5$ ,  $\alpha < 45^\circ$  с увеличением числа каскадов  $n$  и  $m$  быстро возрастает величина суммарной удаленности источника и изображения от поверхности среднего электрода  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ , становится возможным выбор схем, допускающих спрямление линии фокусов вдоль оси симметрии системы ЦЗ. В реальном приборе в этом случае для регистрации конечных энергетических интервалов можно использовать микроканальную пластину в форме полосы.

### Список литературы

- [1] Зашквара В. В., Ашимбаева Б. У., Билинкин А. Ф. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 10. С. 2021—2025.  
 [2] Зашквара В. В., Ашимбаева Б. У. Деп. в ВИНТИ. М., 1988. № 4589-В88.