

ЭНЕРГОФИЛЬТР В ВИДЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА С ТОРЦЕВЫМИ ДИАФРАГМАМИ

Л.П.Овсянникова, С.В.Пасовец, Т.Я.Фишкова

В нашей предыдущей работе [1] получены простые аналитические формулы и рассчитаны режимы работы цилиндрического конденсатора с малым радиусом внутреннего электрода при торцевом впуске пучка заряженных частиц с использованием прямоугольной модели распределения поля. При этом расширяются возможности цилиндрического энергофильтра по сравнению с традиционным зеркальным режимом работы со впуском через внутренний электрод, однако использование прямоугольной модели при наличии открытых торцов приводит к значительным погрешностям результатов. В системе с закрытыми торцами влияние на краевые поля различных не учитываемых при расчете факторов минимально. Это обстоятельство, а также возможность размещения источника и приёмника заряженных частиц в бесполеовом пространстве делают такую систему более удобной для практического использования.

В настоящей работе рассчитана система, представляющая собой два коаксиальных цилиндрических электрода с сильно отличающимися диаметрами, на торцах которых расположены плоские электроды со щелями в виде круглых отверстий либо колец, ось которых совпадает с осью системы. При этом с целью уменьшения количества питающих напряжений на торцевые диафрагмы и один из электродов цилиндрического конденсатора подается одинаковый потенциал. Предпочтительнее заземлять диафрагмы и внутренний электрод, а на внешний подавать потенциал, обеспечивающий фокусировку. В этом случае величина фокусирующего потенциала меньше, чем при заземлении внешнего электрода [1]. Кроме того, при этом упрощается конструкция, так как внутренний электрод может крепиться на торцевых диафрагмах.

Анализ различных конфигураций энергофильтра проводился траекторным методом. Электростатические поля рассматриваемых осесимметричных систем рассчитывались методом интегральных уравнений [2]. Уравнения движения заряженных частиц решались методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Численные алгоритмы реализованы в виде программ на языке FORTRAN 77. Максимальное время расчета одного варианта конструкции энергофильтра на IBM PC AT стандартной конфигурации составляло примерно 1.5 ч.

Нами разработана также программа графической обработки результатов расчетов, обеспечивающая возможность получения информации о задаче путем выведения на дисплей эквипотенциальных линий и траекторий заряженных частиц. Кроме того, по ходу расчетов имеется возможность выведения информации о точках, задающих поверхности электродов, точками коллокации, а также о сетке для расчета полей и траекторий. Вся вышеуказанная информация может быть представлена в произвольном масштабе.

Для определения необходимого количества точек коллокации на электродах и числа узлов сетки при расчете траекторий была рассчитана

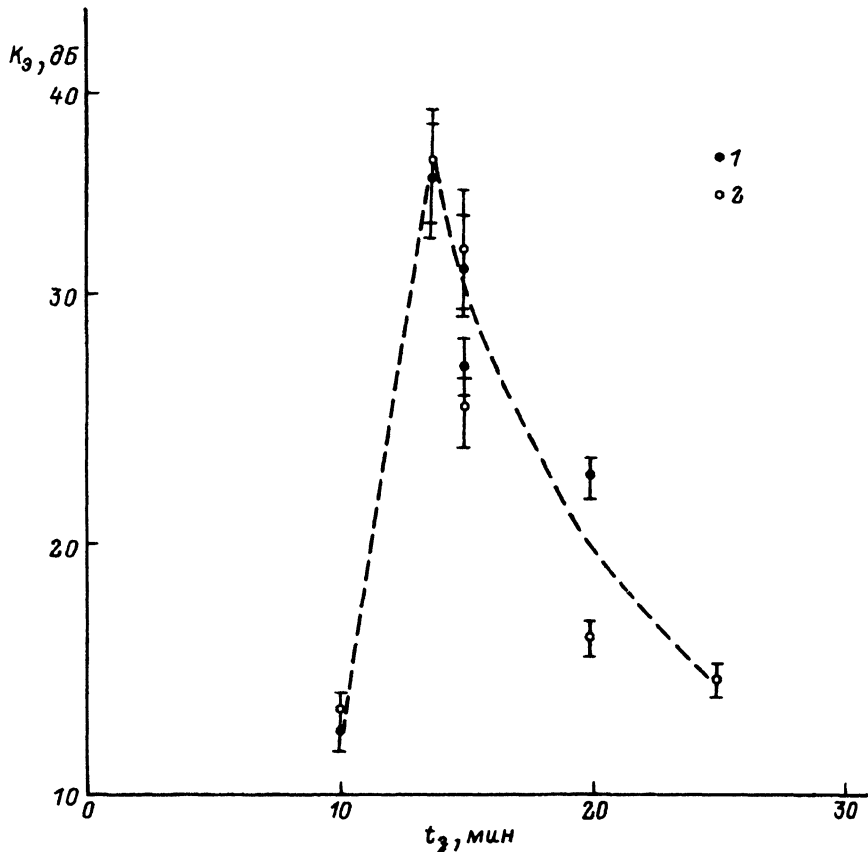


Рис. 1. Цилиндрическое зеркало с $r_2/r_1 = 25$, $U = 920B$ и траектории пучка с энергией настройки $\epsilon = 1000$ эВ при различных углах входа. θ_0 , град: 1 — 67.75, 2 — 68.75, 3 — 66.75.

тестовая задача для цилиндрического конденсатора с двумерным полем в зеркальном режиме работы, которая имеет аналитическое решение (рис. 1). При соотношении радиусов внешнего и внутреннего цилиндров $r_2/r_1 = 25$ расчет по аналитическим формулам работы [1] дает фокусировку первого порядка на ось системы при оптической силе $U/\Phi = 0.920$ (U — разность потенциалов между электродами, Φ — ускоряющий потенциал на входе) и угле впуска центральной траектории пучка $\theta_0 = 67.75^\circ$. В этом случае база анализатора $L = 50.3r_1$, а точка поворота центральной траектории имеет координату $r_{0\max} = 20.0r_1$ (рис. 1). Численный расчет этой задачи по разработанной программе при суммарном количестве точек коллокации $k = 62$ и сетке $n_r \times n_z = 25 \times 55$ (время счета 47 мин) дает $L = 50.0r_1$, $r_{0\max} = 19.9r_1$, т.е. обеспечивает точность не хуже 0.6%.

На рис. 2 представлена оптимизированная геометрия цилиндрического энергоанализатора с заземленными торцевыми диафрагмами. Варьировались четыре геометрических параметра: расстояние между диафрагмами, расстояние от диафрагм до внешнего цилиндра, положение и размер отверстия в торцевых электродах. Критерием оптимальной геометрии являлась острота фокусировки параллельно входящему пучку.

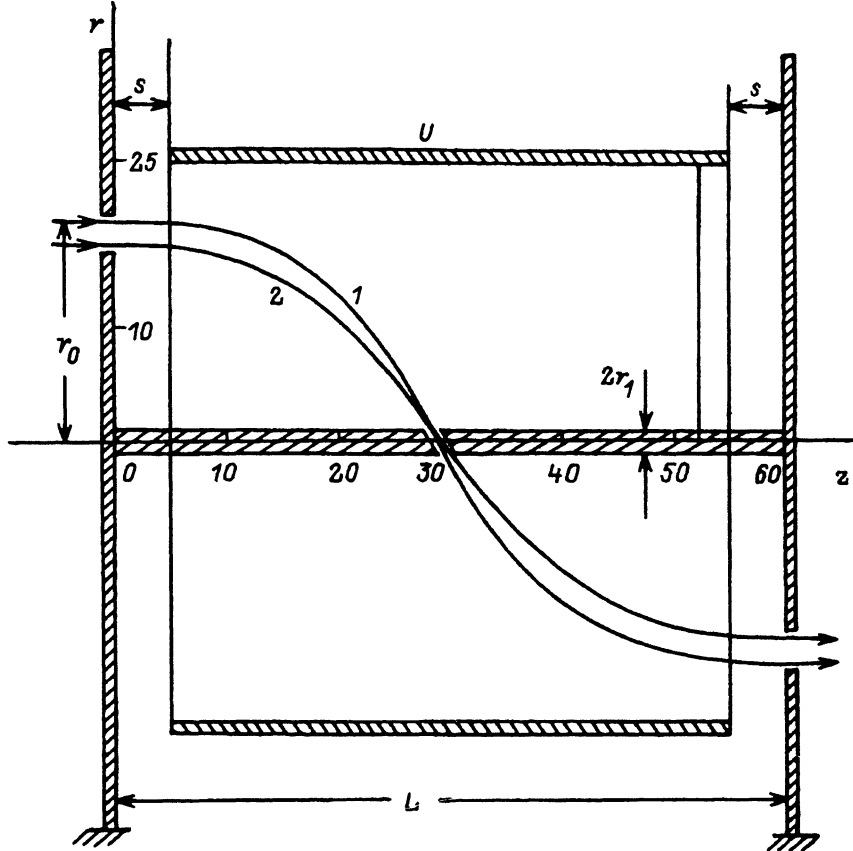


Рис. 2. Цилиндрический конденсатор с торцевыми диафрагмами ($r_2/r_1 = 25$, $s = 5r_1$, $L = 60r_1$, $U = 920$ В), а также крайние траектории пучка с энергией настройки $\varepsilon = 1000$ эВ.
 1 — $r_0 = 17.5r_1$, 2 — $r_0 = 19.5r_1$.

ку на продольную ось системы. При расчетах использовалась сетка из 1500 узлов при количестве точек коллокации, близком к максимальному $k \approx 120$, что обеспечивает точность расчетов, соответствующую тестовой задаче. Следует отметить, что учет реальной толщины внешнего и торцевых электродов, которая примерно равна r_1 , а также наличие щели во внутреннем цилиндре практически не влияют на поведение пучка.

На рис. 3,а приведены зависимости расстояний z_0 от входной диафрагмы до точки пересечения оси z траекториями пучка, входящего в систему параллельно этой оси, от величины входной координаты r_0 при различных значениях величины силы цилиндрического конденсатора U/Φ , близких к оптимальному. На рис. 3,б представлены зависимости фокусных расстояний системы, т.е. расстояний от входной диафрагмы до точки пересечения оси основной траекторией пучка ($r_0 = 18.5r_1$), а также ее углов наклона к оси в этой точке от силы системы. Сплошные линии относятся к системе с тонкими электродами, штриховые — к системе из электродов толщиной r_1 .

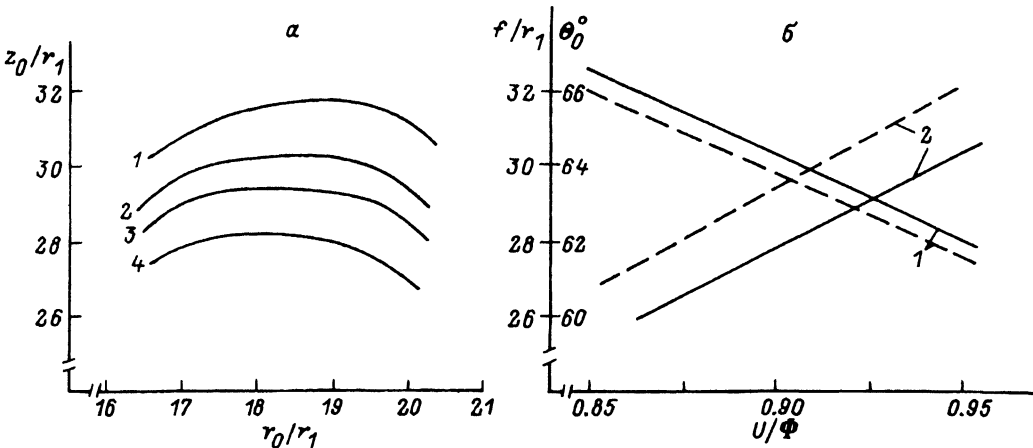


Рис. 3. Параметры цилиндрического конденсатора с торцевыми диафрагмами в режиме параллельного переноса.

a — расстояния от торцевого электрода до точки пересечения оси в зависимости от координаты входа: U/Φ : 1 — 0.87, 2 — 0.90, 3 — 0.92, 4 — 0.95; *b* — фокусные расстояния (1) и углы наклона основной траектории пучка (2) в зависимости от оптической силы системы: сплошные линии — тонкие электроды, штриховые — толщина электродов равна r_1 .

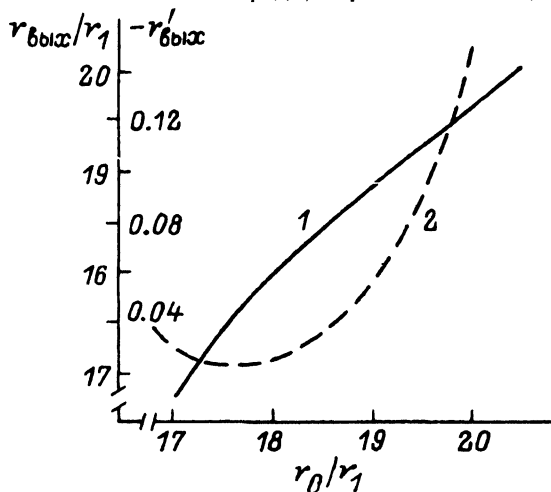


Рис. 4. Выходные параметры пучка для системы параллельного переноса.

1 — координаты, 2 — углы наклона траекторий.

Из рис. 3, *a* видно, что оптимальная сила системы $U/\Phi = 0.920$. При ней достигается наилучшая фокусировка, а именно для пучка с координатой основной траектории $r_0 = 18.5r_1$ и шириной на входе $\Delta r_0 = 2r_1$ размер изображения $\Delta z = 0.4r_1$, при $\Delta r_0 = 3r_1$ — $\Delta z = 0.9r_1$. Фокусировка пучка на ось достигается и при других близких к оптимальной величинах оптической силы системы $U/\Phi = 0.87 - 0.95$ (рис. 3, *a*), однако фокусные расстояния для них заметно отличаются. Это связано с наличием дисперсии по энергии: для системы с данной геометрией коэффициент линейной дисперсии

$$D = \frac{\Delta z}{\Delta \epsilon} \epsilon$$

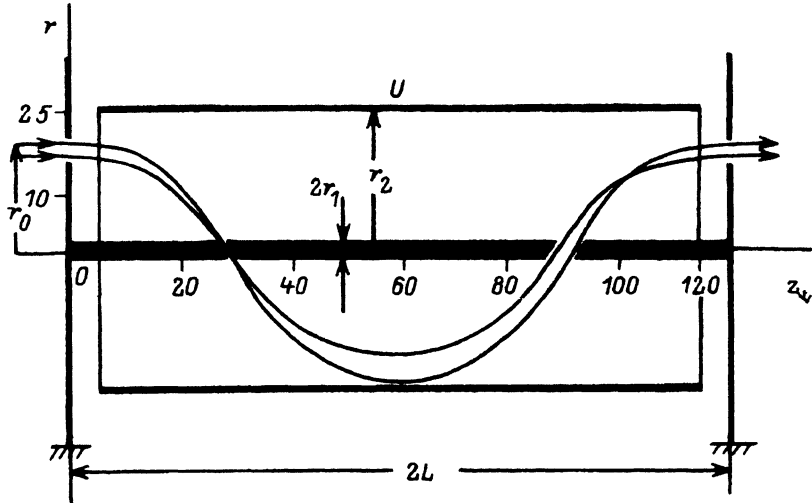


Рис. 5. Цилиндрический конденсатор с торцевыми диафрагмами при прямом ходе пучка ($r_2/r_1 = 25$; $s = 5r_1$, $L = 60r_1$, $U = 920$ В) и траектории пучка с энергией настройки $\varepsilon = 1000$ эВ.

1 — $r_0 = 17.0r_1$, 2 — $r_0 = 19.0r_1$.

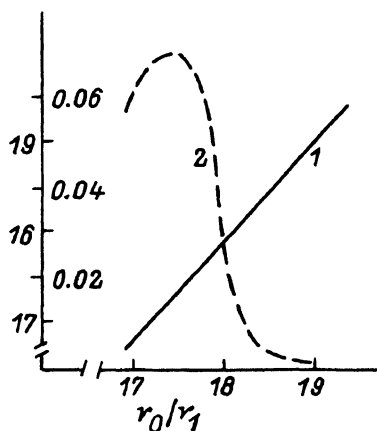


Рис. 6. Выходные параметры для системы с прямым ходом пучка. 1, 2 — то же, что и на рис. 4.

(где $\varepsilon = -e\Phi$) равен $D = (40 \pm 1)r_1$. Это означает, что в щель во внутреннем электроде размером $s = 0.5r_1$, расположенную в области $z = (29.0 - 28.5)r_1$ под углом к оси $\theta_0 = 62.7^\circ$, проходит пучок с шириной на входе $\Delta r_0 = 2.5r_1$ с разбросом по энергии $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 1.2\%$.

Параметры пучка в области выходной диафрагмы в оптимальном режиме работы представлены на рис. 4. Видно, что выходные координаты (кривые 1) близки к соответствующим координатам входа, а углы наклона траекторий пучка к оси составляют $1-6^\circ$. Таким образом, траектории пучка практически антисимметричны относительно азимутальной плоскости, проходящей через точку фокусировки, а система осуществляет параллельный перенос пучка.

Сравнение с классическим цилиндрическим зеркалом (впуск с оси при угле основной траектории $\theta_0 = 42.3^\circ$) показывает, что при одинаковых габаритах обоих устройств их дисперсия по энергии и светосила близки

по величине. Однако в цилиндрическом зеркале источник и приемник должны быть размещены в ограниченном пространстве внутри цилиндра меньшего диаметра, в то время как рассмотренное устройство из двух коаксиальных цилиндров с торцевыми электродами позволяет расположить источник и приемник заряженных частиц в произвольном месте устройства.

Рассчитаны также режимы работы предложенной системы с двукратным пересечением ее геометрической оси пучком частиц, ось которого параллельна последней на входе и выходе. При этом в случае круглого пучка источник и приемник располагаются на одной прямой, т.е. система обеспечивает прямой ход пучка. Такая система показана на рис. 5. Ее поперечные размеры те же, что и у системы параллельного переноса (рис. 2) — $r_2 = 25r_1$, продольные в два раза больше — $2L = 120r_1$. На рис. 5 представлены также крайние траектории пучка с энергией настройки $\varepsilon = 1000$ эВ при потенциале внешнего цилиндра $U = 920$ В и заземленных внутреннем цилиндре и торцевых электродах.

Выходные параметры пучка приведены на рис. 6. Видно, что координаты траекторий на входе и выходе близки по величине, а углы наклона на выходе не превышают 4° . Дисперсия по энергии такой четырехполупериодной системы возрастает примерно в 5 раз по сравнению с двухполупериодной системой (рис. 2) при одинаковой светосиле.

В последнее время была разработана система такого рода с прямым ходом пучка для монохроматизации высококогерентного источника электронов [3]. Она состоит из четырех расположенных определенным образом 90° -ных сферических дефлекторов, т.е. по своей конструкции значительно сложнее рассмотренной в настоящей работе. В то же время дисперсия по энергии предложенного в работе [3] фильтра имеет ту же величину, что и наша система в области первой по ходу пучка щели при радиусе внутреннего цилиндра $r_1 = 3$ мм.

В заключение отметим, что системы с фильтрацией по энергии при прямом ходе пучка заряженных частиц в ряде случаев могут заменить широко распространенные фильтры Вина, причем в отличие от последних в них не используются магнитные поля.

Список литературы

- [1] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 5. С. 179–183.
- [2] Иванов В.Я. Методы автоматизированного проектирования приборов электроники. Ч. 1. Расчет физических полей. Новосибирск, 1986.
- [3] Rose H. // Optik. 1990. Vol. 85. 3. P. 95–98.

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
24 февраля 1992 г.