

Здесь обозначили $\lambda^2 = C/N^2$, где $C = gR_0(1+k)/B$. При существующих на практике значениях g и B параметр $\lambda \gg 1$. Следовательно, (14) представляет собой уравнение Хилла с малым параметром при старшей производной. Это второй основной результат. При моделировании здесь можно менять параметры установки и получать численные решения.

Заключение

В приведенных задачах был сделан анализ для одного магнитного периода, однако при переходе в другую ячейку условия повторяются и можно сделать обобщение на всю замкнутую траекторию.

Литература

1. Жуковский В. Ч., Шишанин О. Е. Влияние бетатронных колебаний электрона на свойства синхротронного излучения// ЖЭТФ. 1971. Т. 61. Вып. 4. С. 1371—1378.

2. Шишанин О. Е. Синхротронное излучение электрона в сильнофокусирующем магнитном поле// Там же. 1993. Т. 103. Вып. 4. С. 1117—1126.

3. Шишанин О. Е. Свойства синхротронного излучения в системе FODO// ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 2. С. 196—200.

4. Шишанин О. Е. Изучение особенностей синхротронного света в системе FOFDOD// Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 20. С. 4—9.

5. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М.: Наука, 1974.

6. Найфэ А. Введение в методы возмущений. — М.: Мир, 1984.

7. Шишанин О. Е. Синхротронное излучение электронов в периодических слабофокусирующих магнитных полях// ЖЭТФ. 2000. Т. 117. Вып. 5. С. 835—843.

8. Мешков И. Н. Транспортировка пучков заряженных частиц. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. — 221 с.

9. Wiedemann H. Design of low emittance storage rings// Nucl. Inst. and Meth. 1986. A 246. №. 1—3. P. 4—11.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Asymptotic method for simulation of particle dynamics in periodic magnetic systems

O. E. Shishanin

Moscow State Industrial University, Moscow, Russia

An analytical description of charge particle motion in the alternating magnetic system of acceleration and storage rings is considered. For this purpose, in particular, the projections of magnetic field are expanded in a Fourier series, resulting in a single equation of Hill's type. A technique of solution for derived differential equations with the periodic coefficients is developed. The results for the FODO system and the example for a linear machine are exhibited.

УДК 539.1

Электростатический энергофильтр с двойной фокусировкой

Л. П. Овсянникова, Т. Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Предложено и теоретически исследовано устройство, фильтрующее по энергии пучки заряженных частиц. Оно состоит из цилиндрического поперечного электрода, в меридиональной плоскости которого расположен плоский заземленный электрод, а по торцам — заземленные диафрагмы, через которые осуществляются ввод и вывод пучка. В широком диапазоне изменения геометрии системы рассчитаны ее параметры для двух случаев: с двойной фокусировкой пучка на плоский электрод и в режиме параллельного переноса пучка.

Введение

В работе [1] исследована ионно-оптическая система, формирующая пучок на вход монополь-

ного масс-анализатора, в которой для предотвращения попадания в пучок рассеянных электронов используется отклоняющая система нетрадиционной конструкции. Система обеспечивает умень-

шение разброса по энергии в ионном пучке. Однако когда требования к моноэнергетичности пучка возрастают, следует ставить фильтр по энергии. Авторы работы [2] предложили и рассчитали численно электростатический энергофильтр в виде двух коаксиальных цилиндров с сильно отличающимися диаметрами. По торцам цилиндров располагались плоские электроды, через отверстия в которых осуществляли впуск и вывод пучка заряженных частиц. Существенным недостатком такой системы является возможность попадания в детектор неотфильтрованных частиц с большим разбросом по энергии в обход нитевидного осевого электрода.

Результаты

В настоящей работе предлагается в меридиональной плоскости внешнего цилиндра вместо нитевидного электрода поместить плоский (рис. 1). Авторы работы определили в аналитическом виде распределение потенциала такой системы в предположении малого зазора между цилиндрическим и плоскими торцевыми электродами, которое равно:

$$\frac{\phi(r, \varphi, z)}{V} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \times \frac{[1 - (-1)^n] I_n[(2k+1)\pi(r/L)] \sin(n\varphi)}{(2k+1)n I_n[(2k+1)\pi(R/L)]} \times \sin[(2k+1)\pi(z/L)],$$

где V — потенциал цилиндрического электрода, плоский и торцевые электроды заземлены;

R и L — радиус и длина цилиндра, соответственно;

I_n — модифицированная функция Бесселя.

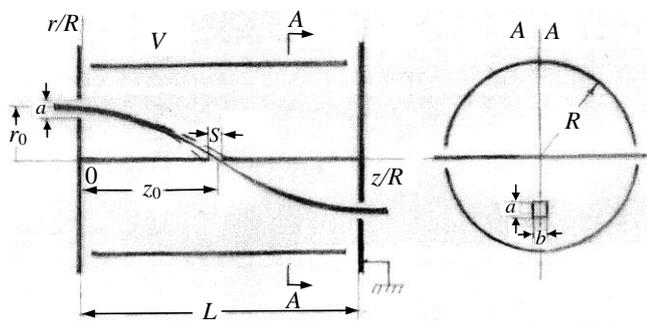


Рис. 1. Электростатический фильтр по энергии для заряженных частиц

Расчеты параметров устройства проведены численно траекторным методом по программе авторов, написанной на основании приведенной выше формулы распределения потенциала.

Пучок заряженных частиц, параллельный продольной оси системы, вводится через переднюю торцевую диафрагму. Рассматривались два возможных варианта работы энергофильтра:

- фокусировка пучка на плоский электрод;
- режим параллельного переноса пучка, когда частицы пересекают плоский электрод посередине системы и выходят через заднюю торцевую диафрагму практически без изменения начального угла наклона.

Такой режим работы предотвращает попадание в детектор рассеянных электронов, нейтральных и метастабильных частиц, т. е. способствует устранению помехоустойчивости различных приборов и экспериментальных физических установок.

Задачей исследования являются нахождение дисперсии системы по энергии в режимах работы, обеспечивающих фокусировку по углу во всех направлениях (так называемая двойная фокусировка), а также определение разрешающей способности по энергии в этих режимах.

Расчеты проведены в широком диапазоне изменения геометрии и силы энергофильтра $\beta = eV/\epsilon_0$, где ϵ_0 — энергия настройки пучка. На рис. 2, а приведены параметры первого варианта работы фильтра длиной $L = 3R$ в зависимости от его силы, когда двойная фокусировка параллельного оси пучка заряженных частиц осуществляется на плоский электрод. На нем все величины отнесены к радиусу цилиндра: коэффициент линейной дисперсии по энергии D/R (кривая 2), фокусное расстояние — расстояние осевой траектории пучка от входной диафрагмы до точки пересечения продольной оси z_0/R (кривая 1), начальное расстояние осевой траектории пучка от плоского электрода r_0/R (кривая 3).

Пучок, попадающий в систему через отверстие во входном торцевом электроде диаметром $0,1 R$, фокусируется целиком на продольную ось системы в щель в плоском электроде, которая имеет размер s/R (кривая 4).

Из кривых рис. 2 видно, что с ростом силы фильтра дисперсия по энергии и фокусное расстояние падают, однако размер сфокусированного пучка несколько уменьшается. Это приводит к тому, что разрешающая способность энергофильтра мало меняется и составляет $\rho = \pm \Delta\epsilon/\epsilon_0 = (0,7—1) \%$, где $\Delta\epsilon$ — разброс в пучке по энергии.

Для осуществления режима параллельного переноса необходимо подобрать такую силу энергофильтра, чтобы осевая траектория пучка пересекала продольную ось на одинаковых расстояниях от торцевых электродов, т. е. длина системы должна быть $L = 2z_0$. Тогда пучок движется во второй половине цилиндра антисимметрично относительно

азимутальной плоскости, проходящей через точку фокусировки осевой траектории. При этом пучок попадает в отверстие выходного торцевого электрода, размер которого совпадает с величиной отверстия во входном торцевом электроде (см. рис. 1). Углы наклона траекторий к оси на выходе малы, а разрешающая способность по энергии не меняется по сравнению с режимом по первому варианту, поскольку зависит лишь от размеров щелей на входе и в плоском электроде. На рис. 2, б приведены результаты расчетов параметров фильтра в режимах параллельного переноса пучка в широком диапазоне изменения его длины $2R \leq L \leq 7R$ при наличии двойной фокусировки.

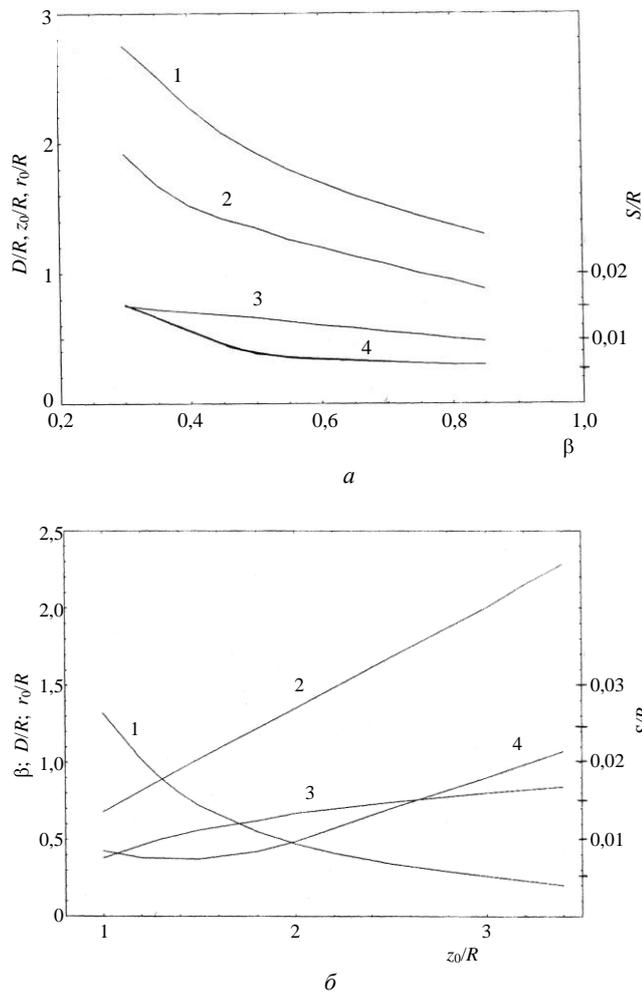


Рис. 2. Параметры энергофильтра в режиме:

a — работы при наличии двойной фокусировки пучка на плоский электрод: 1 — z_0/R ; 2 — D/R ; 3 — r_0/R ; 4 — s/R ;
б — параллельного переноса пучка с двойной фокусировкой: 1 — β ; 2 — D/R ; 3 — r_0/R ; 4 — s/R

Пучок размером $a \times b$ вводится в систему параллельно ее продольной оси ($\alpha_0 = 0$). Задавшись начальным размером пучка в плоскости дисперсии $a = 0,1R$, мы определили его размер b в перпендикулярной плоскости из условия обеспечения двойной фокусировки пучка. Величина b получена из

условия, что весь пучок указанного выше размера попадает в щель плоского электрода s (см. рис. 2, б, кривую 4) с разбросом по энергии в соответствии с величиной коэффициента линейной дисперсии (см. рис. 2, б, кривую 2). Найден также максимальный угол наклона траекторий к оси на выходе системы α_{im} . Результаты расчетов сведены в таблицу. Следует отметить, что максимальная величина углов наклона траекторий на выходе для пучка с энергией настройки ϵ_0 примерно в два раза меньше, чем для пучка с энергиями $\epsilon_0 \pm \Delta\epsilon$, которые приведены ниже.

Показатели	Значение энергии при $a = 0,1R$; $\alpha_0 = 0$						
	L/R	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
β	1,32	0,934	0,715	0,47	0,343	0,261	0,206
ρ , %	1,4	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0
$\pm b/2R$	0,015	0,025	0,035	0,050	0,055	0,060	0,070
α_{im}^0	1,5	1,0	0,86	0,69	0,65	0,59	0,44

Как видно из таблицы, с ростом длины энергофильтра его параметры улучшаются: светосила растет, а сила и угол выхода уменьшаются. Однако разрешение по энергии в 1,5—2 раза выше при средних длинах $L = (3—4)R$ по сравнению с малой и большой длинами системы.

Сравнение энергофильтров, исследованных в данной работе и в работе [2] при их одинаковой геометрии, а также размерах входной и выходной щелей, показало, что разрешающая способность первого в полтора раза выше.

Закключение

На основании результатов проделанной работы следует отметить:

- пропорциональное изменение геометрии энергофильтра не влияет на электронно-оптические свойства системы, поскольку все ее параметры выражены в единицах радиуса цилиндрического электрода (закон геометрического подобия);
- улучшение разрешающей способности энергофильтра может быть достигнуто за счет уменьшения размеров щелей, при этом падает светосила;
- в режиме фокусировки на плоский электрод особенностью фильтра является наличие линейного изображения круглого пучка на входе, что может быть полезно для целого ряда устройств;
- в режиме параллельного переноса исследованный энергофильтр может быть использован в квадрупольных и монопольных масс-спектрометрах, а также в физических установках, в которых из конструктивных соображений должен быть прямолинейный ход пучка.

Л и т е р а т у р а

1. Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я., Сурков В. А.// Прикладная физика. 2006. № 3. С. 88.

2. Овсянникова Л. П., Пасовец С. В., Фишкова Т. Я.//ЖТФ. 1992. Т. 62. № 12. С. 1. (Sov. Phys. Tech. Phys. 1992. V. 12. P. 1215).

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Electrostatic energy filter with double focusing

L. P. Ovsyannikova, T. Ya. Fishkova

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute RAS, St.-Petersburg, Russia

We have proposed and calculated an energy filter composed of a cylinder with some potential and a grounded flat electrode placed in the meridional plane of the cylinder. The charged particle beam is injected and extracted via end grounded diaphragms. Parameters of this system are numerically calculated in a wide range of its geometry. Our system has two modes of operations: double angle focusing on the flat electrode and regime of parallel-transport.

УДК 621.385.632

Оптимизация многоступенчатых коллекторов произвольной конфигурации с рекуперацией для приборов О-типа

В. Д. Журавлева, В. И. Роговин, И. В. Роговин

ФГУП «НПП «Алмаз»», г. Саратов, Россия

Дано описание алгоритмов и программ расчета и оптимизации многоступенчатых коллекторов с торможением произвольной конфигурации для ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов. Функцией цели является КПД коллектора, а варьируемыми параметрами — потенциалы и конфигурация ступеней коллектора, величина и распределение магнитного поля. Для неаксиально-симметричных многоступенчатых коллекторов (МК) оптимизированы смещение, наклон электродов и распределение магнитного поля.

Введение

Использование в ЛБВ МК позволяет существенно повысить технический КПД и сделать их основным сверхвысокочастотным (СВЧ) усилителем для использования в системах связи, локации и навигации. Проектирование МК основано на методах расчета, использующих анализ заданной конфигурации с распределениями электростатических и магнитных полей. Получение оптимального МК с высоким КПД достигается после проведения большого числа расчетов и наличия большого опыта проектирования МК. Сокращение времени проектирования МК возможно за счет применения одного из методов оптимизации, позволяющего варьировать конфигурацию МК, величины потенциалов ступеней и распределения магнитного поля.

Цель данной работы — разработка метода расчета и оптимизации МК.

Расчет и оптимизация многоступенчатых коллекторов

В качестве метода расчета выбран приведенный в работе [1] метод анализа аксиально-симметричных МК, состоящий из нахождения потенциала электростатического поля в МК заданной конфигурации с известным потенциалом на границе с помощью решения интегрального уравнения Фредгольма I рода; определения траекторий многоскоростного электронного потока, моделируемого первичными и вторичными крупными частицами, и последующего вычисления интегральных характеристик, таких как КПД коллектора, значения токов ступеней и выделяемой на них мощности электронного потока.

Непрерывное распределение заряда на границе МК заменено дискретным набором заряженных колец. Если центры этих колец не лежат на одной прямой, а плоскости непараллельны, то метод позволяет рассчитывать электростатическое поле