

УДК 537.2: 519.684

## РАСЧЕТ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ КВАЗИКОНИЧЕСКОГО ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА

© 1996, С.Н.Кольцов, Н.А. Холин

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 20.11.96

В данной статье рассматриваются математическая и компьютерная модели движения заряженных частиц в электростатическом цилиндрическом аксиально неоднородном поле, анализируется характер этого движения и показываются преимущества такого поля. Приводятся начальные параметры движения частиц, оптимальные с точки зрения светосилы и разрешения.

### Введение

В настоящее время самыми известными энергоанализаторами являются сферический дефлектор и цилиндрическое зеркало. Широкое распространение этих энергоанализаторов в первую очередь объясняется их высокими параметрами. Так например, сферический анализатор имеет лучшее разрешение, а цилиндрическое зеркало — наиболее высокую светосилу. Естественно, возникает вопрос: существуют ли полевые структуры, позволяющие построить анализатор, совмещающий в себе достоинства полусферического анализатора и цилиндрического зеркала. Исследованию одной из таких структур с электростатическим цилиндрическим аксиально неоднородным полем посвящена эта статья.

### Математическая модель

Физический потенциал поля описывается выражением [1]:

$$\Phi = \Phi_0 \left( \ln r - \frac{r^2}{2} + z^2 \right) \quad (1),$$

где:  $\Phi_0$  — характеристическое значение потенциала поля;  $r, z$  — безразмерные цилиндрические координаты. Они связаны с реальными координатами следующими соотношениями:  $R=1 \cdot r, Z=1 \cdot z$ . При этом выбранный масштаб  $l=121.03$

определяется из заданного радиуса  $r=90$  мм при  $z=0$ . Так как поле осесимметрично, то азимутальная составляющая движения не учитывается; изучается только меридиональное движение.

Безразмерные эквипотенциалы поля описываются уравнением:

$$\ln r - \frac{r^2}{2} + z^2 = c_i \quad (2),$$

где  $i=1,2$ .

Область поля на основании предварительных расчетов с учетом практических соображений ограничена эквипотенциалами  $\Phi=0.3$  и  $\Phi=0.927$ . Очертание их приведено на рис. 1.

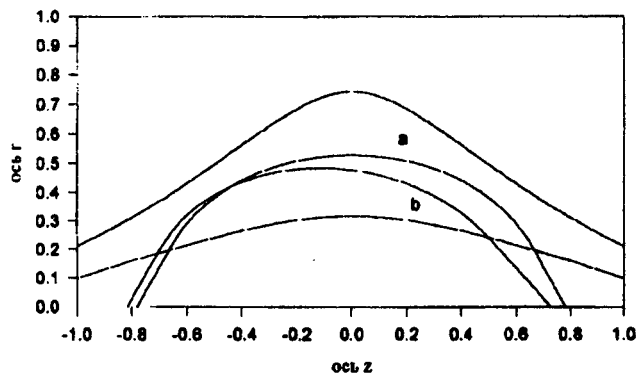


Рис. 1. Схема энергоанализатора: а — симметричная траектория, б — асимметричная траектория.

В математической модели использован точечный источник. В этой модели пренебрегается эффектами краевых полей и действием объемного заряда. Начальная кинетическая энергия электрона выражается в долях характерной потенциальной энергии поля параметром:

$$W = \frac{E_0}{q \cdot \Phi_0} \quad (3),$$

где  $q$  — заряд электрона.

Максимум потенциала определяется следующей формулой:

$$\Phi_0 = \frac{U_2 - U_1}{c_2 - c_1} \quad (4),$$

где  $U_2 - U_1$  — разность напряжений на электродах,

$c_2 - c_1$  — разность номеров эквипотенциалей.

В дальнейшем под энергией старта и точкой старта подразумеваются  $W$  и  $z$ .

Движение электрона в энергоанализаторе делится на три этапа.

1. Начальное движение в бесполовом пространстве. Электрон стартует с оси  $z$  и движется по прямой под заданным углом  $q$  и с заданной скоростью до пересечения с эквипотенциалью внутреннего электрода. Точка пересечения рассчитывается с точностью до  $10^{-11}$ . После пересечения с этой эквипотенциалью начинается второй этап движения.

2. Движение в электростатическом поле описывается следующими уравнениями:

$$\ddot{r} = r - \frac{1}{r}; \quad \ddot{z} = -2z \quad (5),$$

Уравнение интегрируется с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка при начальных данных  $r_0, z_0, q, W$ . Движение происходит до тех пор, пока электрон не выйдет за пределы электростатического поля, то есть пока он не пересечет верхнюю или нижнюю эквипотенциаль.

Шаг расчета берется равным  $h=2\dot{h} = 2 \cdot 10^{-4}$ . Если электрон пересекает эквипотенциаль внутреннего электрода, то моделируется третий этап движения.

3. Конечное движение в бесполовом пространстве. На этом этапе движение происходит по прямой под углом, который рассчитывается в точке пересечения эквипотенциали электрона и определяется следующим соотношением:

$$\operatorname{tg}(a) = \frac{V_r}{V_z} \quad (6),$$

где  $V_r$  — радиальная скорость,  
 $V_z$  — скорость вдоль оси  $z$ .

Концом движения является точка пересечения прямой с осью  $z$ . Полная траектория электрона в энергоанализаторе представляет собой сумму траекторий на каждом этапе движения.

Зависимость точки прилета на ось  $z$  от входных параметров аппроксимируется ортогональными полиномами Чебышева не выше третьей степени при помощи метода наименьших квадратов. На основе этой аппроксимации рассчитывается приведенная дисперсия:

$$D = \frac{W}{P} \cdot \frac{dP}{dW} \quad (7),$$

где  $P$  — точка прилета на ось  $z$ ,

$W$  — энергия электрона, определяемая формулой (3).

Разрешение энергоанализатора рассчитывается следующим образом: В плоскости  $r, z$  задаются координаты отрезка-детектора так, чтобы он пересекал пучок траекторий (при заданной начальной энергии и фиксированном диапазоне углов) в области кроссовера.

Если при изменении энергии старта, но в том же диапазоне углов, пучок выходит за пределы отрезка-детектора, то считается, что эти энергии (заданная и измененная) разрешаются.

#### Анализ движения частицы в энергоанализаторе.

Как показывает предварительный расчет, движение в поле может быть симметричным и ассиметричным. Два типа траекторий показаны на рис. 1. У симметричной траектории угол входа в поле равен углу выхода из поля. Кроме того, точка старта с оси  $z$  равна (по модулю) точке прилета на ось  $z$ . В данном электростатическом поле могут быть реализованы три типа фокусировки: ось-ось, ось-кольцо и кольцо-кольцо. Однако в данной статье проводится анализ фокусировки типа ось-ось, так как такой тип фокусировки наиболее удобен с точки зрения детектирования частиц.

Из расчета получены две главные особенности рассматриваемого поля. Первая — наличие острой фокусировки. Вторая — отсутствие размывания этой фокусировки при существенном расширении диапазона входных углов (примерно до 10-12 градусов). Последнее объясняется тем, что зависимость точки прилета частицы на ось  $z$  от угла старта в рамках этих десяти-двенадцати градусов носит "синусоидальный" характер. Из рис. 2

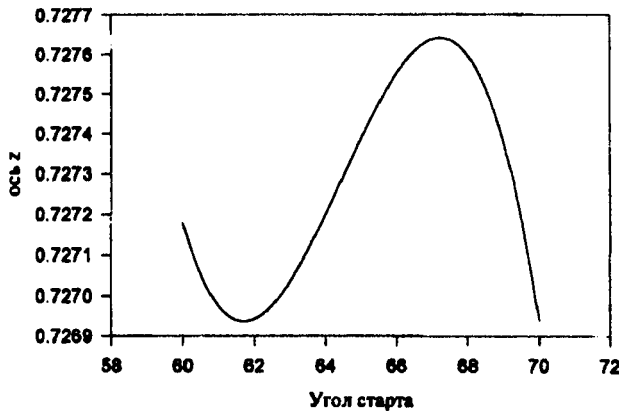


Рис.2. Зависимость точки прилета частицы на ось z от угла старта.

видно, что кроссовер пучка на оси z минимизируется только в диапазоне входных углов  $62^\circ < q < 67^\circ$ , где  $q$  — угол влета электрона в поле относительно оси z. Точки прилета при углах  $60^\circ$ - $62^\circ$  и  $67^\circ$ - $70^\circ$  не выходят за пределы пятна и, следовательно, не расширяют его. Однако при изменении точки старта или энергии старта характер зависимости точки прилета от угла входа может существенно измениться. Разрушение "синусоидального" характера зависимости приводит к значительному ухудшению фокусировки и, следовательно, к потере разрешения. Наилучшая фокусировка наблюдается в диапазоне точек старта z от  $-0.84$  до  $-0.8$ , где величина кроссовера (вдоль оси z) колеблется от  $0.001$  ( $0.12$  мм) до  $0.00061$  ( $0.073$  мм). В других областях величина кроссовера доходит до  $0.008$  ( $0.72$  мм).

Отсюда следует, что с точки зрения наилучшей фокусировки пучка и максимума светосилы, оптимальным диапазоном входных углов является интервал от  $60^\circ$  до  $70^\circ$  (рис. 3), а наилучшей

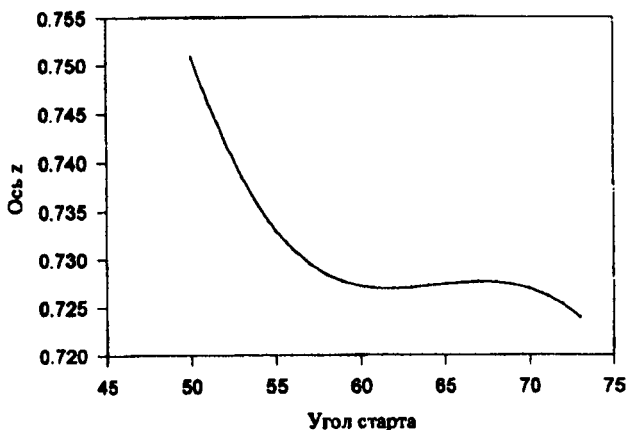


Рис.3. Зависимость точки прилета частицы на ось z от угла старта в диапазоне углов  $[50-73]$  градуса.

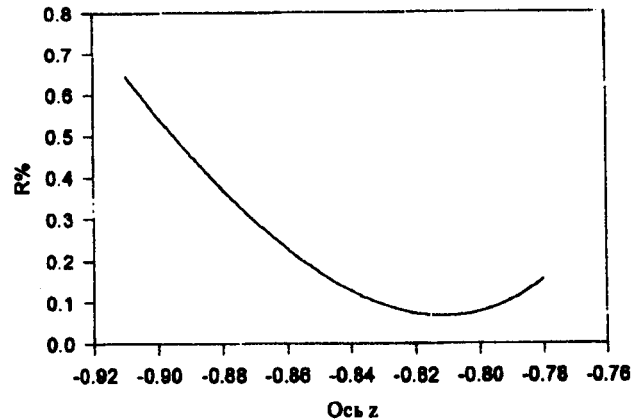


Рис.4. Зависимость разрешения энергоанализатора от точки старта в диапазоне входных углов  $[60-70]$  градусов.

областью точек старта — промежуток  $(-0.84 : -0.8)$ . Светосила в этом случае будет  $15.79\%$  от  $2p$ .

Другой не менее важной особенностью этого поля является большая величина дисперсии по энергии и, как следствие, высокое разрешение. На рис. 4 приведена зависимость разрешения энергоанализатора от точки старта при оптимальном диапазоне входных углов. Из него видно, что область высокого разрешения совпадает с областью наилучшей фокусировки. Разрешение в этом промежутке меняется от  $0.06\%$  до  $0.12\%$ . За пределами интервала  $(-0.8 : -0.84)$  разрешение падает и может доходить до  $0.7\%$ . Для сравнения: однокаскадный анализатор типа цилиндрическое зеркало дает разрешение порядка  $0.3\%$ - $0.5\%$  [2,4], для конденсатора Юза-Рожанского —  $0.28\%$  [3].

#### Заключение

Электростатическое цилиндрическое аксиально неоднородное поле характеризуется двумя важными параметрами, необходимыми для создания наиболее эффективного энергоанализатора. Во-первых, это возможность почти идеальной фокусировки электронного пучка в широком диапазоне входных углов, а во-вторых, это наличие высокого разрешения. Для электростатического энергоанализатора с эквипотенциалами  $\Phi = 0.3$  и  $\Phi = 0.927$ , взятыми в качестве электродов, выгодно использовать следующие параметры: чтобы обеспечить максимальную светосилу при минимальном кроссовере пучка диапазон входных углов старта должен быть равен  $60^\circ$ - $70^\circ$  (светосила при этом —  $15.79\%$ ). Тогда наивысшее разрешение наблюдается в области точек старта  $(-0.84 : -0.8)$  и лежит в пределах от  $0.06\%$  до  $0.1\%$ . Местоположение центра выходной щели по оси z при вышеприведенных параметрах можно выбрать равным  $0.52611$ , а ширину щели  $0.13645$ .

**Литература.**

1. Голиков Ю.К. и др. «Расчет элементов электростатических электронно-оптических систем», Учебное пособие, Ленинград, 1984 г.

2. Crescenzi, Maurizio De. «Structural surface investigations with low-energy backscattered electrons» // Surface Science Reports 21 (1995) 89–175, p. 96.

Dipartimento di Matematica e Fisica, Università di Camerino, 62032 Camerino, Italy.

3. Добрецов Л.Н., Уваров П.Я. «Применение цилиндрического конденсатора для исследования распределения скоростей термоэлектронов». Киев, Изд-во АН УССР, 1952, стр. 251.

4. Козлов И.Г. «Современные проблемы электронной спектроскопии». Москва, Атомиздат, 1978 г.

## CALCULATION AND COMPUTER SIMULATION OF CHARGED PARTICLES MOVEMENT IN THE ELECTROSTATIC FIELD OF A QUASI-CONICAL ENERGY ANALYSER

S.N.Koltsov, N.A.Kholine

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, St.Petersburg*

The article describes mathematical and computer models of charged particles' movement in the electrostatic field of a quasi-conical energy analyser, the characteristics of the movement are analysed and the advantages of the field are shown. The movement's initial parameters, optimal for acceptance angle and resolution, are recommended.

### ***Вниманию читателей!***

Оглавления всех выпусков журнала «Научное приборостроение», начиная с 1995 года, и аннотации всех входящих в эти выпуски статей на английском языке можно найти в сети ИНТЕРНЕТ по адресу: <http://iai.rssi.ru/jnp>