

УДК 537.533.3
ГРНТИ 29.35.3

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ТРАНСАКСИАЛЬНОЙ КАТОДНОЙ ЛИНЗЕ**

Ибраев А.Т.

*доктор физико-математических наук,
Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби,
г.Алматы, РК*

UDC 537.533.3
GRNTI 29.35.3

**FORMATION OF INTENSIVE BEAMS OF CHARGED PARTICLES IN
A TRANSAXIAL CATHODE LENS**

Ibrayev A.T.

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.76.906

АННОТАЦИЯ

В работе предложен метод учета влияния пространственного заряда на качество фокусировки заряженных частиц и исследуется проблема формирования интенсивного потока заряженных частиц с использованием трансаксиальной катодной линзы, которая является частным случаем катодных линз с двумя плоскостями симметрии. В статье решается самосогласованная задача путем разложения функций распределения потенциалов и пространственного заряда в степенные ряды по малым параметрам. Автор использует усовершенствованный и апробированный метод исследования катодных линз, основанный на учете продольной составляющей суммарной аберрации. Получены необходимые уравнения и формулы для расчета параметров и проектирования источника заряженных частиц на основе трансаксиальной катодной линзы.

ANNOTATION

The paper proposes a method for taking into account the effect of space charge on the quality of focusing of charged particles and investigates the problem of the formation of an intense flux of charged particles using a transaxial cathode lens, which is a special case of cathode lenses with two planes of symmetry. The article solves a self-consistent problem by representing the distribution functions of potentials and space charge in the form of power series in small parameters. The author uses an improved and proven method for studying cathode lenses, based on taking into account the longitudinal component of the total aberration. The necessary equations and formulas are obtained for calculating the parameters and designing a source of charged particles based on a transaxial cathode lens.

Ключевые слова: катодная линза, заряженная частица, пространственный заряд, первеанс, электростатический потенциал, ток, фокусировка.

Key words: cathode lens, charged particle, space charge, perveance, electrostatic potential, current, focusing.

Одним из наиболее эффективных методов улучшения основных технических характеристик современных электронно-оптических и ионно-лучевых приборов и устройств является использование в их составе усовершенствованных источников заряженных частиц. При проектировании электронных пушек и ионных источников возникают немало теоретических проблем [1-6]. К их числу можно отнести и необходимость при исследовании их корпускулярно-оптических свойств учета влияния пространственного заряда формируемых электронных или ионных пучков.

В настоящей работе предложен метод учета влияния пространственного заряда на качество фокусировки заряженных частиц и исследуется проблема формирования интенсивного потока

заряженных частиц с использованием трансаксиальной катодной линзы.

Как известно, в слаботочных источниках заряженных частиц, в отличие от сильноточных, нет необходимости учета плотности заряженных частиц. Поэтому, для обозначения условий, при которых источник является сильноточным и влиянием пространственного заряда пренебрегать нельзя, вводится специальный параметр, называемый первеансом пучка заряженных частиц, который определяется по формуле:

$$P = \frac{I}{U^{3/2}}, \quad (1)$$

где P - первеанс, I, U - ток пучка и ускоряющее напряжение формирующей пучок системы, соответственно.

На основе экспериментальных исследований установлено, при значениях первеанса менее $10^{-8} a/\epsilon^{3/2}$ пространственный заряд не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на качество фокусировки потока заряженных частиц, но при более высоких значениях первеанса учет пространственного заряда необходим.

В настоящее время существует немало научных работ, посвященных приближенному учету пространственного заряда в двумерных эмиссионных и фокусирующих электронно-оптических элементах или узлах, т.е. в плоско-

симметричных (цилиндрических) и осесимметричных источниках заряженных частиц, которые ныне широко используются на практике. Влияние пространственного заряда в электронно-оптических системах с двумя плоскостями симметрии остается еще малоизученным вопросом [7].

В данной работе рассматривается влияние пространственного заряда на параметры формируемых пучков в трансаксиальной катодной линзе (рис.1), которая является одной из наиболее перспективных разновидностей двояко-симметричной катодной линзы.

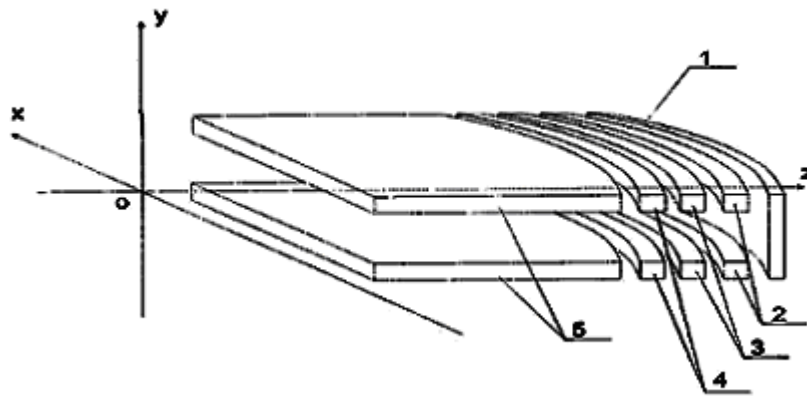


Рисунок 1. Трансаксиальная катодная линза

Введем декартову систему координат x, y, z . Отметим, поле в трансаксиальной катодной линзе обладает вращательной симметрией и заряженные частицы в этом поле движутся в направлении, которая перпендикулярно оси y , которая является осью вращательной симметрии электростатического поля. Ось z рассматриваемой линзы совпадает с ее главной оптической осью, плоскость xz совпадает со средней плоскостью поля. На практике, общем случае, достаточно обеспечить необходимую структуру фокусирующего поля только в области движения

заряженных частиц, поэтому, электроды трансаксиальной катодной линзы могут выполняться в виде частей тел вращения, оси вращательной симметрии которых совпадают с осью y . На приведенном выше рисунке катод 1 выполнен в виде части цилиндра, кроме того, щели между электродами 2,3,4,5 выполнены (вырезаны) по окружностям, с центрами окружностей на оси y .

Распределение электростатического потенциала $\phi(x, y, z)$ вблизи главной оптической оси рассматриваемой электронной линзы может быть представлено в виде ряда

$$\phi(x, y, z) = \Phi + \Phi_{20}x^2 + \Phi_{20}y^2 + \Phi_{22}x^2y^2 + \Phi_{40}x^4 + \Phi_{04}y^4 + \dots, \quad (2)$$

где $\Phi = \Phi(z)$ - функция распределения потенциала вдоль главной оптической оси; $\Phi_{20}, \Phi_{02}, \Phi_{22}, \Phi_{40}, \Phi_{04}$ - функции от координаты z .

При наличии пространственного заряда функция распределения электростатического потенциала $\rho = \rho(x, y, z)$ удовлетворяет уравнению Пуассона [5]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -4\pi\rho. \quad (3)$$

Распределение пространственного (объемного) заряда также представим в виде степенного ряда

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{4\pi}(\rho_0 + \rho_{20}x^2 + \rho_{02}y^2 + \dots), \quad (4)$$

где ρ_0 - распределение объемного заряда вдоль главной оптической оси, ρ_{20}, ρ_{02} - функции, зависящие от z .

Подставив степенные ряды (2) и (4) в уравнение (3) и учитывая вращательную симметрию электростатического поля относительно оси y , находим, что для функций, описывающих поле трансаксиальной катодной линзы, выполняются следующие соотношения:

$$\Phi_{02} = \Phi_2 = -\frac{1}{2}\left(\Phi'' + \frac{\Phi'}{z} + \rho_0\right), \quad (5)$$

$$\Phi_{04} = \Phi_4 = -\frac{1}{12} \left(\Phi''_{02} + \frac{\Phi'_{02}}{z} + \rho_{02} \right), \quad (6)$$

$$\Phi_{20} = \frac{\Phi'}{2z}, \quad (7)$$

$$\Phi_{22} = \frac{\Phi'_{02}}{2z}, \quad (8)$$

$$\Phi_{40} = \frac{1}{8z} \left(\frac{\Phi'}{z} \right)' + \frac{1}{24} \left(\frac{\rho'_{02}}{z} - 2\rho_{20} \right). \quad (9)$$

Катод трансаксиальной катодной линзы (рис.1), потенциал которого принимается равным нулю, расположен на расстоянии R_x от начала координат.

Движение заряженной частицы с зарядом e и массой m в поле исследуемой линзы удовлетворяет уравнениям:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -e \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (10)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -e \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad (11)$$

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = -\frac{2e}{m} (\phi + \varepsilon), \quad (12)$$

где $(-e)\varepsilon$ – величина начальной энергии заряженной частицы.

Координаты движения произвольной частицы при исследовании движения пучка заряженных частиц в катодных линзах и электронных зеркалах следует выражать через координаты основной (опорной) частицы, начальная энергия которой равна нулю и которая движется вдоль главной оптической оси. Поэтому, введем переменную z_0 , которая представляет собой координату основной частицы и связана с осевой координатой произвольной частицы следующим соотношением

$$z = z_0 + \eta(z_0), \quad (13)$$

где функция $\eta(z_0)$ характеризует продольную абберацию произвольной частицы.

Кроме того, z_0 удовлетворяет уравнению

$$\left(\frac{dz_0}{dt} \right)^2 = \sqrt{-\frac{2e}{m} \Phi(z_0)}. \quad (14)$$

Подставив (2), (4), (13) и (14) в уравнения (10)-(12) и оставляя при рассмотрении только члены первого порядка малости, получим параксиальные уравнения

$$2\Phi x'' + \Phi' x' - \frac{\Phi'}{z} x = 0, \quad (15)$$

$$2\Phi y'' + \Phi' y' + \left(\Phi'' + \frac{\Phi''}{z} + \rho_0 \right) y = 0. \quad (16)$$

Общие решения линейных однородных уравнений (15) и (16) имеют вид

$$r_n = a_n w_n + b_n h_n, \quad (17)$$

где $n = x, y$, причем $r_x = x$ и $r_y = y$, w_n и h_n – частные линейно-независимые решения этих уравнений.

Из уравнения (15) видно, что в горизонтальном направлении трансаксиальной катодной линзы влияние пространственного заряда на траектории заряженных частиц в параксиальном приближении отсутствует. В уравнение (16) явно входит значение осевой составляющей пространственного заряда. Это означает, что пространственный заряд в вертикальном направлении порождает дополнительные абберации.

Как известно, значение пространственного заряда потока заряженных частиц связано со значением плотности тока j следующим образом

$$\vec{j} = \rho \vec{v}. \quad (18)$$

Здесь стрелка над символом обозначает, что отмеченная стрелкой переменная является векторной величиной, \vec{v} – скорость движения частиц в пучке.

С учетом (14) ρ_0 можно представить в виде

$$\rho_0 = \frac{j_0}{\sqrt{-\frac{2e}{m} \Phi}} = \sqrt{-\frac{m}{2e} \frac{j_0}{\Phi}}. \quad (19)$$

Здесь j_0 – осевая составляющая плотности тока, т.е. значение плотности тока вдоль главной оптической оси в первом приближении.

Величина полного тока пучка I может быть определена путем интегрирования плотности тока эмиссии катода

$$I = \iiint j(x_k, y_k, z_k) dx_k dy_k dz_k, \quad (20)$$

где индекс « k » указывает на принадлежность величины поверхности катода. Значения функции $j(x_k, y_k, z_k)$ зависят от вида эмиссии.

Плотность тока пучка, как известно, можно выразить через значения полного тока и площади сечения пучка S следующим выражением:

$$j_0 = \frac{I}{S}. \quad (21)$$

Сечение пучка при $a_n = r_{nk}$ характеризуется частными решениями w_x и w_y , значения которых на поверхности катода принимаются равными единице.

Уравнение (16) представим в виде

$$2\Phi y'' + \Phi' y' + \left(\Phi'' + \frac{\Phi''}{z} \right) y = -\rho_0 y. \quad (22)$$

С учетом (19) и (21) из уравнения (22) получим

$$2\Phi y'' + \Phi' y' + \left(\Phi'' + \frac{\Phi''}{z} \right) y = -\sqrt{-\frac{m}{2e} \frac{I}{\Phi S}} y. \quad (23)$$

В (23) принимаем $S = xy$, где вместо x подставим w_x , вместо y подставим w_y . Тогда получим

$$2\Phi y'' + \Phi' y' + \left(\Phi'' + \frac{\Phi'''}{z}\right)y = -\sqrt{-\frac{m}{2e}} \frac{I}{\sqrt{\Phi w_x}}. \quad (24)$$

В работе [6] показано, что

$$w_x = \frac{z}{R_x}. \quad (25)$$

С учетом выражения (25) из (24) имеем

$$2\Phi y'' + \Phi' y' + \left(\Phi'' + \frac{\Phi'''}{z}\right)y = -\sqrt{-\frac{m}{2e}} \frac{I R_x}{\sqrt{\Phi} z}. \quad (26)$$

В последнем уравнении отношение радиуса кривизны катода к координате z характеризует степень сжатия или расширения пучка в горизонтальном направлении.

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение (26) можно решить методом вариации произвольных постоянных

$$y_\rho = -\frac{1}{\Phi'} \left\{ w_y \int \frac{h_y}{\sqrt{\Phi}} f_\rho dz - h_y \int \frac{w_y}{\sqrt{\Phi}} f_\rho dz \right\}. \quad (27)$$

Здесь y_ρ - значение аберрации, связанной с пространственным зарядом,

$$f_\rho = \sqrt{-\frac{m}{2e}} I R_x \frac{1}{z \sqrt{\Phi}}. \quad (28)$$

Отметим, что параксиальное уравнение горизонтального направления двояко-симметричной корпускулярно-оптической системы, в общем случае, в отличие от являющейся частным случаем трансаксиальной линзы,

содержит члены, выражающие влияние пространственного заряда. Поэтому для этого направления двояко-симметричной катодной линзы также определяется аналог функции (28). Далее в этих линзах, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, можно оценить влияние пространственного заряда на параметры фокусировки заряженных частиц.

В заключение отметим, полученные выше результаты позволяют с необходимой точностью учитывать влияние пространственного заряда при проектировании корпускулярно-лучевых систем, формирующих интенсивные потоки заряженных частиц, например, электронных прожекторов, ионных источников, электронных и ионных зондов, а также других видов эмиссионных систем различных приборов и устройств электронной и ионной оптики.

Список литературы

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. - М.: Сов. Радио, 1966. - 456с.
2. Пирс Дж.Р. Теория и расчет электронных пучков. - М.: Сов. Радио, 1956. - 215с.
3. Власов А.Г., Шапиро Ю.А. Методы расчета эмиссионных электронно-оптических систем. - Л.: Машиностроение, Л. отд. 1974. - 183с.
4. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. - Л.: Энергия, 1972. - 271 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. - М.: Наука, 1973 - 504с.
6. Ибраев А.Т., Сапаргалиев А.А., Трансаксиальная электростатическая катодная линза. - ЖТФ, 1981, т. 51, №1, с. 22-30.
7. Ibrayev A.T. Theory of Cathode Lens with Multipole Components of Electrostatic Field and the Space Charge. doi:10.1017/S1431927615013495. - Microscopy and Microanalysis, 2015, V. 21, N6, P. 270-275.

УДК 669-1
ГРНТИ 53.49

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 110X18М-ШВД

Киселева С.К.

к.т.н., доцент кафедры МиФМ ФГБОУ ВО

*«Уфимский государственный авиационный технический университет»,
г. Уфа*

Заринов Н.Г.

д.т.н., профессор кафедры МиФМ ФГБОУ ВО

*«Уфимский государственный авиационный технический университет»,
г. Уфа*

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования влияния равноканального углового прессования на микроструктуру и картину износа высоколегированной подшипниковой стали 110X18М-ШВД. Показано, что формирование в результате равноканального углового прессования однородной ферритной структуры с равномерно распределенными высокодисперсными карбидными частицами приводит к изменению трибологических свойств.