

УДК 537.533.3

Комплекс программ автоматического проектирования электронно-оптических систем "Зонд". Лебедев Г.В., Тимченко Н.А. // Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. Л.: Наука, 1989, с. 111-116.

Описывается структура комплекса программ "Зонд", предназначенных для проектирования в режиме диалога многоэлементных фокусирующих электронно-оптических систем, проводится расчет влияния на параметры фокусировки пучка заряженных частиц смещения электродов линзовых элементов, приведена структура комплекса программ.
Лит. - 1 назв.

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ "ЗОНД"

Комплекс программ "Зонд" предназначен для проектирования в режиме диалога многоэлементных фокусирующих электронно-оптических систем. Анализ параметров фокусировки основан на статистическом моделировании потока заряженных частиц в последовательности электростатических элементов.

Проектирование проводится в несколько этапов:

создание библиотеки электростатических электронно-оптических элементов, которое включает в себя описание геометрии электродов элемента, расчет на выбранной сетке потенциала и его производных до второго порядка включительно;

исследование трансформации непараксиального пучка заряженных частиц в выбранном из библиотеки электростатическом элементе;

анализ аберрационных характеристик и режимов фокусировки пучка в электростатических линзах;

определение принципиальной схемы многоэлементной электронно-оптической системы, выбор конкретных электронно-оптических элементов, задание условий эмиссии потока заряженных частиц, критериев оценки параметров пучка и оптимизации электронно-оптической системы;

расчет допусков электронно-оптической системы на точность изготовления полеобразующих электродов и взаимной юстировки элементов;

задание режимов вывода информации и структуры создаваемой документации.

Комплекс программ имеет блочную структуру в соответствии с описанными этапами и позволяет интегрировать электронно-оптическую систему из следующих элементов:

катодный узел, состоящий из эмиттирующего (в том числе острейного) и фокусирующих электродов. Для расчета поля при наличии мелкоструктурного элемента используется метод вложенных областей. В катодном узле задаются поверхности эмиссии заряженных частиц, в том числе совпадающие с поверхностью электрода. Преобразование фазовых координат заряженных частиц определяется из уравнений движения;

оптический узел, динамика пучка в котором анализируется на основе статистического моделирования потока заряженных частиц, движущегося в электростатическом поле;

электростатическая аксиально-симметричная линза. Преобразование фазовых координат заряженной частицы представляется в виде аберрационного полинома с учетом

геометрических aberrаций третьего и хроматических aberrаций второго порядка;

электростатическая линза типа диафрагмы, распределение потенциала в которой имеет аналитическое представление. При прохождении пучка учитывается его коллимация;

ускоряющий промежуток, где предполагается, что потенциал меняется по линейному закону, а преобразование фазовых координат частиц представляется в аналитической форме;

кольцевая коллимирующая диафрагма, в плоскости которой проводится анализ относительного пропускания и статистических параметров потока заряженных частиц;

образец, в плоскости которого проводится анализ и оптимизация параметров пучка;

информационная плоскость, где определяется формат вывода статистических параметров пучка и электронно-оптических характеристик элементов.

Расчет потенциала электронно-оптических элементов

Расчет потенциала и его производных в катодном и оптическом узлах, а также в электростатической линзе проводится методом интегральных уравнений теории потенциала с использованием сплайновой аппроксимации поверхностной плотности заряда (см. литературу). Для уравнения Лапласа $\Delta U = 0$ рассматривается смешанная краевая задача в области D с границей $\Gamma = \bigcup \Gamma_i$, состоящей из контуров Γ_i , на которых могут быть заданы следующие граничные условия:

условие Дирихле $\varphi|_{\Gamma_i} = A(Q),$

условие Неймана $\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}}|_{\Gamma_i} = B(Q),$

условие Ньютона $(\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} + F * \varphi)|_{\Gamma_i} = C(Q),$

условие сопряжения на границе сред $\varphi|_{\Gamma^-} = \varphi|_{\Gamma^+}, \epsilon_- \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}}|_{\Gamma^-} = \epsilon_+ \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}}|_{\Gamma^+},$ где $Q = (r', z')$ — точка на границе области в цилиндрической, а $Q = (x', y')$ — в декартовой системе координат. A, B, C, F — заданные функции координат, ϵ_-, ϵ_+ — диэлектрические проницаемости сред, $\vec{n}$ — вектор нормали к границе, которая в общем случае является незамкнутой, неодносвязной и может содержать угловые точки. Решение уравнения Лапласа ищется в виде потенциала простого слоя.

Для повышения точности расчета поля в системе электродов с разномасштабными элементами используется метод вложенных областей. Так, при наличии в системе электродов мелкомасштабного элемента, например, острейного катода с малым радиусом закругления острия, выделяется область, называемая внутренней областью, и содержащая мелкомасштабный элемент. Затем решается краевая задача во внешней области, определяются условия на границе внутренней области и решается краевая задача для внутренней области с вычисленными граничными условиями.

С целью повышения эффективности расчета электронно-оптических характеристик многоэлектродного элемента при вариации потенциалов электродов участки его границы с одинаковыми граничными условиями определяются как электрод и решается $N-1$ краевая задача (N — число электродов) с единичными граничными условиями. Тогда при произвольных значениях потенциалов на электродах распределение потенциала электронно-оптического элемента представляется как линейная суперпозиция решений единичных краевых задач.

Траектория заряженной частицы в катодном и оптическом узле находится из уравнений движения:

$$\begin{cases} \dot{r} = -\frac{e}{m} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \\ \dot{z} = -\frac{e}{m} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

где e — заряд частицы, а m — ее масса. Решение системы (1) ищется методом локальной линеаризации, когда потенциал системы в окрестности точки (r_0, z_0) представляется в виде

$$\varphi(r, z) = \sum_{i,j=0}^{i+j \leq 2} \frac{1}{i!j!} \varphi_{ij}(r_0, z_0) (r - r_0)^i (z - z_0)^j, \quad (2)$$

где $\varphi_{ij} = \frac{\partial^{i+j} \varphi(r_0, z_0)}{\partial r^i \partial z^j}$.

Для потенциала вида (2) система уравнений (1) имеет аналитическое решение, причем вектор фазовых координат частицы $\vec{X} = \{r, \dot{r}, z, \dot{z}\}$ за время Δt преобразуется по линейному закону:

$$\vec{X}_1 = A(\Delta t) \cdot \vec{X}_0 + B(\Delta t). \quad (3)$$

Тогда матрица A и вектор B при заданном шаге по времени Δt являются постоянными в окрестности рассматриваемой точки (r_0, z_0) и преобразование фазовых координат частицы в области электронно-оптического элемента описывается как последовательность преобразований вида (3).

При расчете движения частицы в линзе преобразование фазовых координат описывается абберрационным полиномом, коэффициентами которого являются геометрические абберрации третьего и хроматические абберрации второго порядков.

Моделирование динамики пучка заряженных частиц и определение его статистических характеристик

Для оценки параметров электронно-оптической системы используется метод статистического моделирования потока заряженных частиц. На эмиттирующей поверхности задается начальное координатно-угловое энергетическое распределение фазовых координат пучка. При задании исходных данных в режиме меню могут быть использованы стандартные распределения, а именно, равномерное и линейное распределение по координате, равномерное и косинусоидальное относительно нормали к эмиттирующей поверхности угловое распределение, равномерное и максвелловское распределение по энергии. Кроме того, существует возможность задания пользователем нестандартного распределения.

Прохождение заряженной частицы через электронно-оптическую систему описывается как последовательное преобразование ее фазовых координат в каждом из элементов системы.

Параметры пучка, как-то координатный и угловой размеры на фазовой плоскости, форма эмиттанта и положение кроссовера, энергетический разброс, определяются в заданных информационных плоскостях на основании его среднестатистических характеристик. Так, среднеквадратичный эмиттанс пучка $E = 4[\bar{r}^2, \bar{r}'^2 - (\bar{r}\bar{r}')^2]^{1/2}$ выражается через вторые моменты функции распределения фазовых координат пучка в заданной информационной плоскости. $Z = Z_{inf}$:

$$\bar{r}^2 = \iint r^2 f(r, r') dr dr' / \iint f(r, r') dr dr'$$

$$\bar{r}'^2 = \iint r'^2 f(r, r') dr dr' / \iint f(r, r') dr dr'$$

$$\bar{r}\bar{r}' = \iint r r' f(r, r') dr dr' / \iint f(r, r') dr dr',$$

где интегрирование ведется по всей области фазового пространства, занимаемого пучком.

Тогда максимальные координатный и угловой размеры эмиттанта пучка определяются как $r_m = 2(\bar{r}^2)^{1/2}$, $r'_m = 2(\bar{r}'^2)^{1/2}$, а положение кроссовера пучка относительно информационной плоскости и его линейный и угловой размеры соответственно равны $\Delta Z_{kr} = -\bar{r}\bar{r}'/\bar{r}'^2$, $\kappa_{kr}' = r'_m$, $\kappa_{kr} = E/\kappa_{kr}'$.

В информационной плоскости вычисляются также распределение интенсивности потока частиц на фазовой плоскости, коэффициент пропускания системы, средняя энергия и дисперсия энергетического распределения.

Р а с ч е т д о п у с к о в

Рассматривается влияние смещения электродов линзовых элементов, вариации потенциалов на них, а также сдвига и поворота относительно оптической оси элементов электронно-оптической системы на параметры фокусировки пучка заряженных частиц.

Смещение электродов выражается в возмущении распределения потенциала в окрестности оптической оси линзы и, как следствие, в вариации ее электронно-оптических характеристик.

Относительный поворот и сдвиг электронно-оптических элементов системы учитывается в преобразовании фазовых координат пучка при моделировании потока заряженных частиц.

Результатом расчета являются значения поправок к статистическим характеристикам пучка в заданных информационных плоскостях в зависимости от возмущающих параметров.

С т р у к т у р а к о м п л е к с а п р о г р а м м и и с х о д н ы х д а н н ы х

Комплекс программ состоит из следующих основных блоков:

POLE — расчет электрических полей катодных, оптических и линзовых узлов, создание библиотеки распределений полей (BIB).

LINZ — исследование электронно-оптических характеристик линзовых элементов и оптимизация их фокусирующих свойств, которые реализованы в следующих программах:

LINZ-PAR — вычисление кардинальных элементов (оптическая сила, положение главных плоскостей, положение фокальных плоскостей) и коэффициентов сферической и хроматической аберраций для 2-, 3- и 4- электродных линз.

- LINZ-OBG** - расчет 3-электродной объективной линзы с заданной геометрией. По заданным потенциалам крайних электродов, рабочему расстоянию, линейному увеличению и масштабному множителю вычисляются потенциал среднего электрода, положение объекта, сферическая и хроматическая аберрации,
- LINZ-KOG** - расчет 3- и 4-электродной конденсорной линзы с заданной геометрией. По заданным потенциалам крайних электродов (а для 4-электродной линзы еще и потенциалу 1-го внутреннего электрода), положению объекта, рабочему расстоянию и масштабному множителю вычисляются потенциал среднего электрода, линейное увеличение, сферическая и хроматическая аберрации,
- LINZ-OBE** - оптимизация 3-электродной объективной линзы. По заданным потенциалам, рабочему расстоянию и линейному увеличению вычисляются масштабный множитель, положение объекта, сферическая и хроматическая аберрации,
- LINZ-KON** - оптимизация 3-электродной конденсорной линзы. По заданным потенциалам, положению объекта и масштабному множителю вычисляются рабочее расстояние, линейное увеличение, сферическая и хроматическая аберрации.

Кроме того, в программах LINZ- по заданным начальным параметрам пучка вычисляются его параметры в кроссовере и плоскости изображения.

- TRACE** - исследование формирования потока заряженных частиц в электронно-оптическом элементе. Для заданного координатно-углового энергетического распределения фазовых координат эмиттируемого сугубонепараксиального пучка заряженных частиц проводится анализ его параметров на выходе из элемента. Вычисляются распределение интенсивности на координатно-угловой фазовой плоскости, дисперсия энергетического распределения, параметры среднеквадратичного эмиттенса, положение и размеры кроссовера пучка.
- SISTEM** - анализ и оптимизация многоэлементной электронно-оптической системы (ЭОС). Этот блок в свою очередь состоит из следующих последовательно вызываемых программ:
- SCHEMA** - формирование принципиальной схемы ЭОС. Типы элементов из библиотеки (BIB) задаются оригинальными именами,
- SCALE** - задание масштабных множителей электронно-оптических элементов и направления прохождения пучка,
- PONENT** - задание значений потенциалов на полеобразующих электродах элементов ЭОС,
- INFORM** - задание положения и характеристик обработки параметров пучка на информационных плоскостях,
- EMISS** - задание положения эмиссионных поверхностей и параметров, определяющих модель эмиссии потока заряженных частиц,
- START** - компиляция электронно-оптической схемы и запуск расчета и оптимизации ЭОС.

Если группа каких-либо параметров электронно-оптической системы не меняется, то расчет системы возможен с того этапа, на котором предполагается изменение параметров.

VAR - расчет допусков электронно-оптической системы.

Максимальное число электронно-оптических элементов рассчитываемой системы - 20. Задаваемыми параметрами катодного узла являются потенциалы электродов, опти-

ческого узла и линзы – потенциалы электродов, масштабный множитель, направление прохождения пучка, ускоряющего промежутка – его длина, линзы типа диафрагма – радиус отверстия и потенциал электрода, кольцевой диафрагмы – внутренний и внешний радиусы отверстия (по умолчанию внутренний радиус равен нулю).

Разработанный комплекс программы "ЗОНД" использовался при расчете и оптимизации растровых электронных пушек электронных спектрометров, ионных пушек для установок вторичной растровой масс-спектрометрии, при разработке ионной оптики установки масс-спектрометра с плазменным источником ионов, при оптимизации масс- и энергоанализаторов с транспортирующими линзовыми системами, при разработке ионно-оптической схемы ионной растровой литографической установки.

Комплекс программ реализован на машинном языке **FORTRAN** в операционной среде **MS/DOS IBM/PC-AT**, а также **OS** и **CBM EC**.

ЛИТЕРАТУРА

Иванов В.Я., Ильин В.П. Решение смешанных краевых задач для уравнения Лапласа методом интегральных уравнений//Типовые программы решения задач математической физики. Новосибирск: ВЦ АН СССР. 1975.-С.5-35.