

УДК 621.385.833

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛИ НА БАЗЕ МИКРОВАКУУМНЫХ ЯЧЕЕК

Б. Н. Васичев

Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики",
Москва, Россия

Показана возможность использования микровакуумной ячейки в качестве элемента вычислительной системы (микропроцессора). Представлены математическая и физическая модели цилиндрической многоэлектродной структуры субмикронных размеров, физика формирования электронных пучков низких энергий и метод математического моделирования микроэлектронно-оптических систем (микроЭОС). Численное моделирование таких структур может быть реализовано с помощью Wide-angle optics-пакета программ, разработанного для моделирования электронно-лучевых аксиально-симметричных систем, содержащих непараксиальную широкоугольную оптику при малых начальных энергиях электронов. Рассмотрены оригинальные электромагнитные электронно-оптические элементы микроЭОС.

В последние годы достигнуты определенные успехи в формировании микровакуумных устройств с использованием технологии вакуумной микроэлектроники как перспективных элементов сверхтонких катодно-лучевых трубок, вакуумных микроэлектронных приборов и даже планируется использовать подобные структуры для создания устройств, осуществляющих экспонирование рисунков топологических слоев интегральных схем методами микролитографии [1—3]. Обсуждаются возможности создания магнитных сенсоров на базе микровакуумных ячеек [4—7]. Однако наиболее перспективным, на наш взгляд, является создание сверхскоростных вакуумных электронно-лучевых вычислителей.

Преимущества электронно-лучевых вычислителей (ВЭЛ) перед твердотельными интегральными схемами очевидны. Здесь арифметические действия, лежащие в основе компьютерной идеологии вытеснены более сложными математическими операциями — интегральным преобразованием Фурье. Это позволяет повысить быстродействие и увеличить объем параллельно обрабатываемой информации на несколько порядков. Известные оптические вычислители не нашли широкого применения по ряду причин. Основными недостатками оптических вычислителей являются трудность изготовления оптических микролинз и дифракционные ограничения их размеров, трудность реализации управляемых транспорантов, невозможность перестроения оптической схемы во время ее работы. Электронная оптика позволяет легко преодолеть все трудности.

Математическая модель ВЭЛ

Учитывая, что электрон обладает волновыми свойствами, а пучок в электронно-оптической системе достаточно близок к когерентному комплексному спектру сигнала, передаваемого электронным пучком, то он может быть представлен в виде распределения амплитуд и фаз. Реальное изображение частотной области (спектра) сигнала в задней фокальной плоскости электронной линзы отдельно для положительных и отрицательных частот позволяет достаточно просто управлять переходной характеристикой электронно-оптического решающего устройства [8].

Простейшим электронно-лучевым решающим устройством является электронно-оптическая система, состоящая из одной или двух сопряженных электронных линз. На рис. 1 представлена электронно-оптическая система, состоящая из

входной диафрагмы (которая в данном случае является транспорантом), помещенной на расстоянии L_1 перед электронной линзой Λ_1 , и экрана (приемника), помещенного на расстоянии L_2 позади линзы с координатами ξ и η , где формируется выходной сигнал $s(\xi, \eta)$.

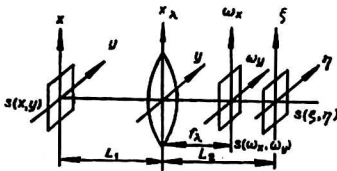


Рис. 1. Схема элементарной ячейки ВЭЛ

Если весь пучок, несущий информацию от входной диафрагмы (транспоранта), проходит без ограничения через линзу, то максимальные пространственные частоты сигнала будут меньше максимальной частоты полосы пропускания линзы, определяемой апертурным углом α_0 , т. е.

$$\alpha_0 \gg \lambda w_{\max} / 2\pi.$$

Сигнал в плоскости входной диафрагмы обозначим $s(x, y)$. Сигнал на выходе линзы обычно имеет вид [8]:

$$s(\xi, \eta) = \exp\left[\frac{ik}{2L_1}(\xi^2 + \eta^2)\right] \frac{1}{\lambda g L_1 L_2} \iint_{xy} s(x, y) \exp\left[\frac{ik}{2L_1}(x^2 + y^2)\right] \times \\ \times \exp\left\{-\frac{ik}{2g}\left[\left(\frac{x}{L_1} + \frac{\xi}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{y}{L_1} + \frac{\eta}{L_2}\right)^2\right]\right\} dx dy.$$

Здесь k — волновое число в окружающей среде;

λ — длина волны;

$$g = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} - \frac{1}{f_\lambda};$$

f — фокусное расстояние электронной линзы.

Если входная плоскость (сигнала) расположена в передней фокальной плоскости линзы $L_1 = f_\lambda$, а выходная плоскость совпадает с задней фокальной плоскостью $L_2 = f_\lambda$, то выходной сигнал имеет в этом случае следующий вид:

$$s(\xi, \eta) = \frac{1}{\lambda f_\lambda} \iint_{xy} s(x, y) \exp\left[-\frac{ik}{f_\lambda}(x\xi + y\eta)\right] dx dy.$$

Выходной сигнал в задней фокальной плоскости линзы является преобразованием Фурье от входной сигнала, расположенного в передней фокальной плоскости линзы. Угол отклонения лучей и их координаты в выходной плоскости пропорциональны частоте сигнала:

$$\xi = \frac{\omega x}{k} f_\lambda = \frac{\omega x}{2\pi} \lambda f_\lambda, \quad \eta = \frac{\omega y}{k} f_\lambda = \frac{\omega y}{2\pi} \lambda f_\lambda.$$

Элементарная электронно-оптическая система позволяет одновременно формировать позади линзы изображение входного сигнала с коэффициентом увеличения M и его спектр. Регистрация этих сигналов зависит от взаимного расположения электронных линз. Используя двухлинзовую систему, можно, изменяя оптическую силу второй линзы, переносить в одну плоскость изображение и спектр для удобства их регистрации и для осуществления операций над ними. Вторая линза осуществляет такое же преобразование Фурье над сигналом

$$I(\omega_x, \omega_y) = I/\lambda f_\lambda s(\omega_x, \omega_y).$$

Прохождение сигнала через такую электронно-оптическую систему можно представить как двойное преобразование Фурье, т. е. в плоскости ξ, η будет фиксироваться спектр сигнала $s(x, y)$

$$s(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(x, y) \exp[i(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy,$$

а в плоскости (x_1, y_1) снова сигнал:

$$s(x_1, y_1) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(\omega_x, \omega_y) \exp[-i(\omega_x x_1 + \omega_y y_1)] d\omega_x d\omega_y.$$

Так как в обоих случаях производится прямое преобразование Фурье, то изображение на выходе имеет обратное направление осей координат, т. е. изображение получается перевернутым.

При необходимости сложения двух сигналов в передней фокальной плоскости электронной линзы надо расположить транспорт, формирующий сигналы $s_1(x, y)$ и $s_2(x, y)$, соответственно, по обе стороны от оптической оси. В задней фокальной плоскости электронной линзы электронный пучок, прошедший через этот транспорт, создаст изображение суммы спектров входных сигналов:

$$s_1(\omega_x, \omega_y) + s_2(\omega_x, \omega_y) = \exp[-ik2f_\lambda] \int_0^{x/2} \int_{-y/2}^{y/2} s_1(x, y) [-i(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy + \\ + \exp[-ik2f_\lambda] \int_{-x/2}^{x/2} \int_{-y/2}^{y/2} s_2(x, y) \exp[-ik(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy.$$

Изменяя оптическую силу линз, можно выполнять различные действия с входным сигналом.

Физическая модель ВЭЛ

Функционирование микровакуумных устройств основано на управлении потоков электронов очень малой энергии в вакуумных промежутках микронных и субмикронных размеров. Инжекция электронов пучка в микровакуумный промежуток осуществляется методом автоэлектронной (не исключается возможность использования смешанной — автоэлектронной и термоэлектронной или фотоэлектронной эмиссии) с поверхности микрокатода. На рис. 2 представлен лезвийный полевой катод. Эмиссией управляют изменением потенциала на управляющих электродах, расположенных на расстоянии порядка долей микрона от эмитирующей поверхности катода. Микровакуумные устройства формируются на основе массива микроячеек из мультигетерогенных систем, выполненных по групповой технологии.

В данной работе в качестве электронно-лучевого вычислителя рассматривается микровакуумная ячейка, которая представляет собой многоэлектродную твердотельную структуру, с цилиндрической формой вакуумного канала с автоэлектронным источником кольцевого типа (см. рис. 2).

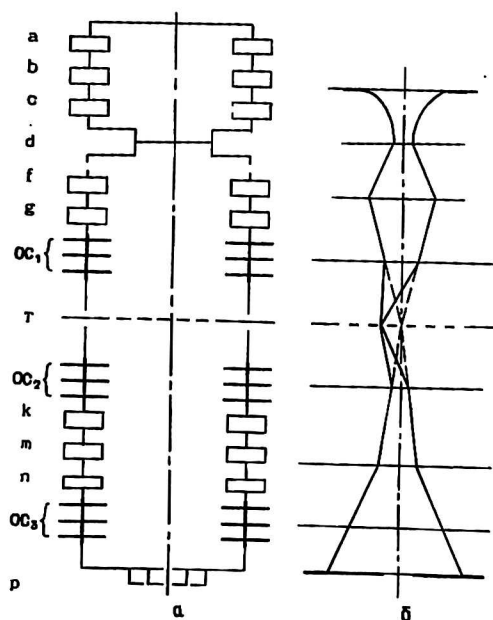


Рис. 2. Осевое сечение микровакуумного вычислителя (а) и его оптическая схема (б):

- a—c* — управляющие электроды генератора электронов;
- b* — лезвийный катод ячейки генератора электронов;
- d* — анод генератора электронов;
- f* — второй анод;
- g* — электрод с потенциалом анода, он же может выполнять функции однополюсной магнитной линзы;
- г* — транспорт;
- OC_{1, 2, 3}* — отклоняющие системы;
- k, m, n* — полюсные наконечники конфокальной системы;
- p* — приемник

одиночная линза

Характерные размеры межэлектродных промежутков электронно-оптических функциональных элементов могут варьироваться от долей микрона до нескольких микрон. Общая протяженность вакуумного канала — до нескольких миллиметров. Катод представляет собой тонкую диафрагму (толщиной 50—100 Å). Диаметр отверстия в катоде 5—15 мкм. На расстоянии долей микрометра от эмитирующей поверхности в целях создания требуемых сильных (более 10^7 В/см) электрических полей при не слишком высоких управляющих напряжениях (несколько вольт) расположены управляющие электроды. Микроячейка представляет собой цилиндрический канал. Нижнее основание ее цилиндра служит анодом, а верхнее — экраном. На боковых поверхностях цилиндра расположены три кольцевых электрода. Средний из них является лезвийным эмиттером [9—11], а два других — управляющими. Толщина таких электродов, выполненных из сильнолегированного кремния, составляет от 0,1 до 0,3 мкм, а промежутки между ними от 0,1 до 0,5 мкм. Расстояние от кольцевого эмиттера до анода так же, как и до экрана, равно 0,5 мкм. Поверхность канала сформирована из изолирующего цилиндра. В задачу микроячейки электронной пушки входят эмиссия и формирование электронного пучка. Роль фективного источника электронов выполняет отверстие в аноде. Двух- и более лучевая электронная пушка значительно расширяет технические возможности микроприбора.

Собственно вычислитель состоит из электронной пушки и дополнительных электродов f , g , которые образуют одиночную линзу, фокусирующую пучок электронов на транспоранте T . Отклоняющая система OC_1 управляет позиционированием пучка в задаваемую точку транспоранта. Этим обеспечивается ввод данных для их обработки. Одиночная электростатическая линза собственно и является вычислителем. Она преобразует поступающий сигнал в спектр, в плоскости изображения которого расположен полупроводниковый приемник. Приемник представляет собой ПЗМ структуру. Толщина слоя 8 мкм. Квантовый выход таких структур при облучении их электронами около $3 \cdot 10^3$. Даже при потерях носителей тока за счет рекомбинации коэффициент усиления составляет около $1 \cdot 10^3$. Регистрация сигнала может осуществляться как в обычных ПЗС. OC_2 осуществляет возврат пучка на оптическую ось; OC_3 сканирует изображение спектра по щели приемника, благодаря чему осуществляется последовательное считывание результата вычисления способом кодирования информации о локальной по времени интенсивности сигнала. Если ячеек ПЗС несколько — считывание может осуществляться параллельно.

Для полной реализации проекта требуются электронная оптика исключительно высокого качества и микроэлектронные схемы, обслуживающие ее. Коэффициенты осевых aberrаций электронных линз, к примеру, должны быть порядка 0,1 мм, что практически недостижимо без специальных приемов. Компенсировать этот недостаток можно либо за счет уменьшения угловой апертуры пучка, что приводит к потере тока и потому требует применения электронного источника с высокой электронной яркостью, либо за счет коррекции aberrаций, например, с помощью мультипольных корректоров. Поставленная задача может быть решена при использовании линз с несколько пониженным пространственным разрешением и с коэффициентами хроматической и сферической aberrаций около 1—2 мм. Такими aberrационными свойствами обладают так называемые линзы *spot* или однополюсные магнитные линзы [12, 13]. Такие линзы более компактны по сравнению с традиционными. Конструктивное решение этих линз позволяет одновременно с основной своей ролью выполнять и другие, например, формировать магнитное фокусирующее поле в зоне действия автоэмиссионного катода или анода [14], что способствует повышению электронной яркости источника электронов.

В традиционном варианте линза может представлять собой либо одиночную электростатическую линзу, состоящую из трех электродов с отверстиями по оптической оси, либо магнитную, состоящую из двух дисков с отверстиями по оптической оси, между которыми расположен третий диск с прорезью, выполняющий роль обмотки возбуждения. Однако в нашем случае лучшим вариантом является однополюсная линза (рис. 3, а).

При разработке микроЭОС в ряде случаев целесообразно применение конфокальных систем, т. е. системы из двух линз, в которых задняя фокальная плоскость первой линзы совмещена с передней фокальной плоскостью второй линзы (рис. 4). В такой системе линз возможно снижение полевых aberrаций. В световой оптике расчет такой системы, при известных координатах фокальной плоскости каждой линзы, достаточно прост. В электронной оптике при использовании магнитных линз знание электронно-оптических характеристик каждой из линз не позволяет определить характеристики системы в случае, если расстояние между линзами сравнимо с диаметром каналов в линзах.

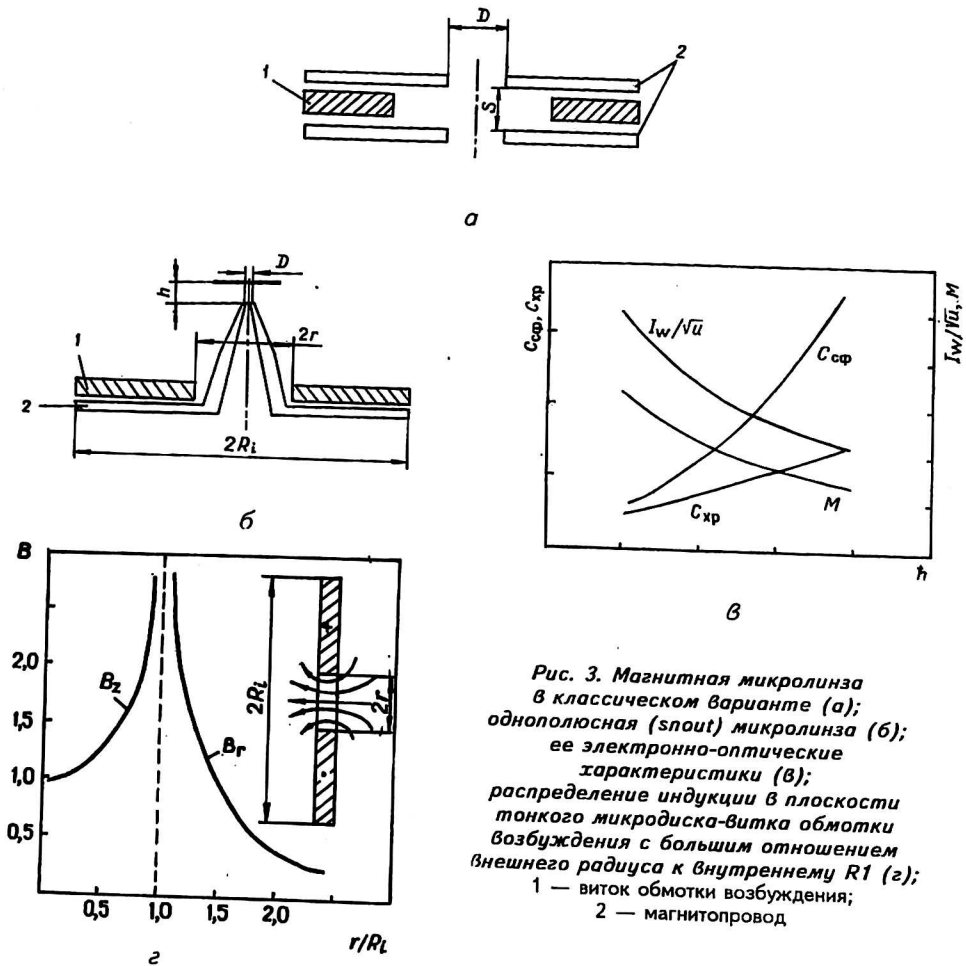


Рис. 3. Магнитная микролинза в классическом варианте (а); однополюсная (spout) микролинза (б); ее электронно-оптические характеристики (в); распределение индукции в плоскости тонкого микродиска-витка обмотки возбуждения с большим отношением внешнего радиуса к внутреннему $R1$ (г); 1 — виток обмотки возбуждения; 2 — магнитопровод

В этом случае возникают некоторые особенности расчета конфокальных систем, вызванные тем, что поля магнитных линз имеют, строго говоря, бесконечную протяженность. При сближении линз взаимное наложение полей приводит к тому, что каждая линза становится несимметричной. Соответственно изменяется положение передней и задней фокальных плоскостей, т. е. нарушается условие конфокальности. Анализ aberrаций конфокальной системы показал, что при строгом соблюдении принципов конфокальности и подобия минимизируются изотропная и анизотропная дисторсия. Кома системы не может отсутствовать, так как интегралы до и после центра подобия отличаются в коэффициент подобия раз.

Однако при практической реализации такой системы не удастся избавиться от aberrации дисторсии и при кодировании транспоранта и ее следует учитывать. Это происходит из-за того, что при наложении полей линз происходит нарушение подобия поля системы до и после центра подобия. Практически для магнитных линз невозможно получить строго подобия поля, так как тогда в центре подобия возникает особая точка (разрыв производной магнитного поля).

Получить идеально подобное распределение поля невозможно, но можно попытаться приблизиться к нему [15]. Для этого двухлинзовая система должна

иметь в центральном полюсном наконечнике, находящемся в центре подобия системы, отверстие малого сечения.

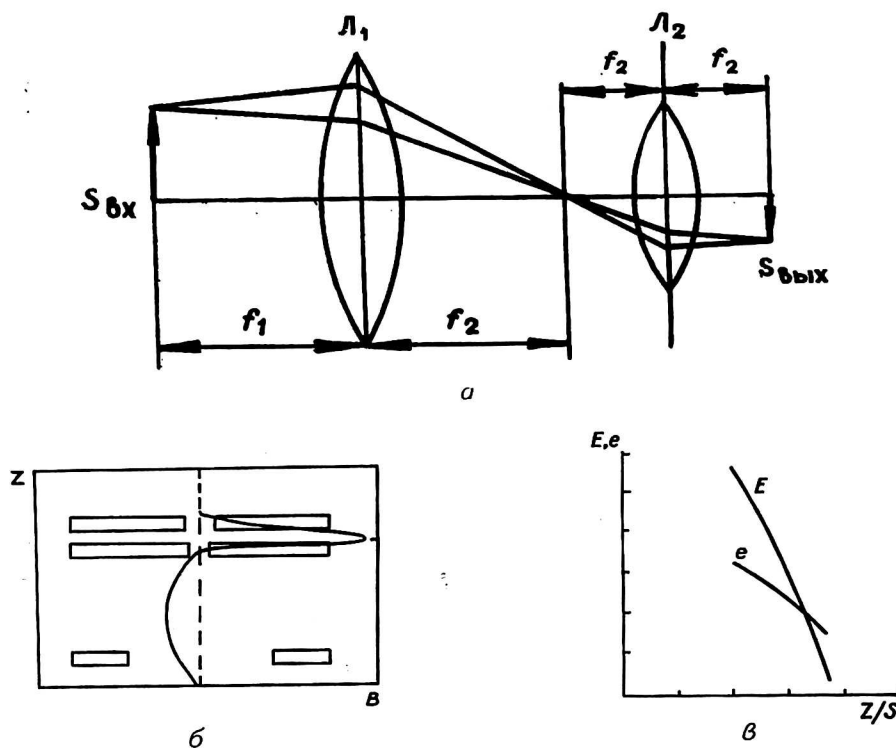


Рис. 4. Схема конфокальной системы (а); распределение осевой компоненты магнитной индукции B в системе подобных линз со средним полюсным наконечником малого диаметра (витки обмоток возбуждения, расположенные между полюсами линз не показаны) (б); коэффициенты изотропной E и анизотропной e дисторсии системы подобных линз со средним полюсным наконечником малого диаметра (в)

Система ввода информации состоит из прозрачного для электронов тонкопленочного шаблона с информационными кодами, последовательное или параллельное считывание которых с помощью управляемых отклоняющих систем позволяет вводить в ВЭЛ информацию. Считывание информации осуществляет полупроводниковый целевой детектор, чувствительный к электронам малых энергий совместно с управляемой отклоняющей системой либо матричной полупроводниковой структурой высокого пространственного разрешения.

Физика формирования электронных пучков низких энергий

Физика электронных пучков низких энергий более сложна, чем высоких энергий, так как включает в себя несколько дополнительных сильных взаимодействий. Дополнительные взаимодействия, которые оказывают большое влияние на формирование и транспортирование электронного пучка вдоль канала ВЭЛ, заключаются в следующем:

- кулоновское взаимодействие электронов в пучке;
- взаимодействие со слабыми внешними полями;
- повышенная хроматическая абберация;
- повышенная дифракция на диафрагмах;

помехи и пульсации в цепи источников питания;
 сильное взаимодействие со случайными зарядами на стенках канала;
 взаимодействие электронов с атомами остаточных газов в канале.

Моделирование низковольтных электронно-лучевых микроячеек должно осуществляться с учетом всех перечисленных факторов.

Анализ кулоновского эффекта имеет принципиальное значение при моделировании электронно-оптической системы микроячейки, так как в отличие от внешних факторов, которые в принципе могут быть устранены (требуемым остаточным давлением газов, выбором материалов конструкции, магнитной и электростатической защитой и т. д.), взаимодействие электронов всегда имеет место и принципиально не устранимо. В связи с этим очень важно исследовать вопрос о границах области существенного влияния кулоновских взаимодействий в рассматриваемых диапазонах энергий и токов пучка. В общем случае разделяют два механизма проявления кулоновских эффектов: увеличение хроматической аберрации в плоскости изображения, обусловленное дополнительным уширением энергетического спектра пучка за счет взаимодействия электронов в продольном направлении и уширение самого пучка за счет взаимного отталкивания электронов в радиальном направлении. Существуют различные теории кулоновского взаимодействия заряженных частиц, отличающихся статистическими моделями пучка, доминирующим типом столкновений и т. д., однако ни одна из них не рассматривает электронный пучок как волновой пакет, что существенно в данном случае.

Математическое моделирование микроЭОС ВЭЛ

Математическое моделирование микроЭОС основывается на решении стационарных уравнений Максвелла для электрических и магнитных полей, формируемых электронно-оптической системой, и расчете электронных потоков в них. Статическая постановка обусловлена стационарным режимом работы основных функциональных элементов. Для отклоняющих систем и систем бланкирования в большинстве случаев допустимо квазистатическое приближение с разделением пространственной и временной части функций, характеризующих поля. При больших частотах (более 100 кГц) строгий расчет должен строиться на нестационарных уравнениях Максвелла. МикроЭОС используют слаботочные пучки, поэтому при расчете собственным электромагнитным полем пучка можно пренебречь, разделяя полевую и траекторную задачи. Пространственный заряд является одним из основных факторов, определяющих параметры пучка, поэтому при моделировании микроЭОС должна решаться самосогласованная траекторно-полевая задача.

В основном расчет микроЭОС сводится к расчету электрических и магнитных полей, траекторий электронов пучка и аберраций. В общем случае распределение электрического поля в области оси находится из решения неоднородного уравнения Лапласа (уравнения Пуассона) для потенциала $U(\vec{r})$:

$$\Delta U(\vec{r}) = - \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0},$$

где ρ — пространственная плотность заряда; Δ — оператор Лапласа.

Важным моментом в постановке полевой задачи является определение границы расчетной области и корректное описание граничных условий. При использовании сеточных методов (конечно-разностных и конечно-элементных) расчет-

ная область замыкается и, помимо задания значений потенциала, на граничных электродах априорно должно задаваться распределение потенциала на искусственно вводимых участках границы Γ в виде краевых условий:

первого рода

$$\text{или} \quad U|_{\Gamma_j} = f_j$$

второго рода

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{\Gamma_j} = 0,$$

которое ставится обычно на оси или плоскостях симметрии, а также на границе, достаточно удаленной от интересующей области.

Таким образом, при моделировании микроЭОС в электростатическом исполнении решается, как правило, смешанная краевая задача с условиями, которые в общем виде можно записать как краевые условия третьего рода

$$(1 - \delta_1^j) \frac{\partial U}{\partial n} + \delta_1^j (U - f_j) = 0,$$

где δ_1^j — символ Кронекера; n — нормаль к границе поверхности; f_j — функции, задаваемые исходя из физического смысла.

Электромагнитное поле может быть полностью описано с помощью четырех функций: скалярного потенциала $\varphi(x, y, z, t)$ и вектор-потенциала $A(x, y, z, t)$, которые вместе составляют четырехмерный вектор в пространстве-времени. Напряженности электрического и магнитного полей выражаются через производные этих функций.

При решении осесимметричных задач чаще используется векторный потенциал $\vec{A}(r)$. Магнитная полевая задача сводится при этом к краевой задаче или к задаче в неограниченной области для уравнения

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu\mu_0} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{j},$$

где \vec{j} — объемная плотность токов; μ_0 — магнитная постоянная.

На поверхности раздела сред с различной магнитной проницаемостью μ должны выполняться условия непрерывности нормальной составляющей вектора магнитной индукции

$$(\vec{n}, \vec{B}) = \text{const}$$

и касательной составляющей напряженности магнитного поля $\vec{H} = \frac{1}{\mu\mu_0} \vec{B}$,

$$[\vec{n}, \vec{H}] = \text{const}.$$

Их выполнение обеспечивается условиями сопряжения для векторного потенциала:

$$\begin{aligned} (\vec{n}, \text{rot} \vec{A}) &= \text{const}, \\ \left[\vec{n}, \left(\frac{1}{\mu\mu_0} \text{rot} \vec{A} \right) \right] &= \text{const}. \end{aligned}$$

Универсальным методом расчета объемных зарядов и плотности электронного тока является метод больших частиц [16].

Для описания стационарных электронных потоков наиболее экономичной является модель трубок тока или парциальных пучков, форма которых определяется характерными траекториями электронов, подчиняющимися уравнению Лоренца

$$\vec{a}_i = -\frac{e}{m} \vec{E} - \frac{e}{m} \left[\vec{v}_i \times \vec{B} \right],$$

где \vec{v}_i и \vec{a}_i — скорость и ускорение выделенного электрона i -й трубки, соответственно. Такая модель также является достаточно универсальной в том смысле, что не предполагает ламинарности и моноэнергетичности электронных потоков. Моделируя поток большим числом трубок тока в соответствии с начальным распределением электронов по величине и направлению скорости (энергии и углу вылета), можно получать детальную информацию о структуре пучка в любом сечении, включая эпюры компонент плотности тока.

Для вычисления напряженности электрического поля ($\vec{E} = -\text{grad } U$) и магнитной индукции ($\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$) в точках траекторий должны проводиться дифференцирование и интерполяция решений соответствующих полевых задач.

Моделирование микроЭОС состоит из четырех этапов:

определение переходной характеристики микроЭОС ВЭЛ;

определение электрических и магнитных полей в микроканале ВЭЛ;

расчет электронных потоков в микроканале ВЭЛ;

определение электронно-оптических характеристик, от которых зависят технические характеристики микроЭОС как вычислителя.

При проведении электронно-оптических расчетов наиболее сложными являются проблемы, возникающие при расчете широкоугольных электронно-оптических систем. Это в первую очередь связано с быстрорастущей, по мере удаления от оси симметрии системы, ошибкой расчета потенциала в произвольной точке пространства, вычисляемого обычно с помощью плохосходящегося ряда через осевое распределение потенциала, известное в конечном числе точек, а также через четные производные потенциала, рассчитываемые численными методами.

Для точного расчета траекторий, проходящих на большом удалении от оси, необходимо иметь аналитическое выражение, описывающее распределение магнитных и электрических полей во всем интересующем нас пространстве. Развитый автором с сотрудниками в работах [17—19] метод аппроксимации осесимметричных полей на большом удалении от оси позволяет решить эту задачу с большой точностью. Для реализации этого метода моделирования разработан пакет программ, предназначенный для расчета с высокой точностью в декартовой системе координат параксиальных и непараксиальных траекторий заряженных частиц, движущихся в комбинированных полях, включающих в себя осесимметричные, мультипольные и несимметричные электростатические и магнитные поля, а также для расчета электронно-оптических характеристик 1-го порядка и аббераций указанных систем [20].

Литература

1. Spindt C. A., Brodic I., Numfrey L., Westerberg E. R. // J. Applied Phys., 1976. V. 47. № 12. P. 5248.
2. Makhov V. I., Duzhev N. A., Koslov A. I.: 1st Int. Vacuum Microelectronic Conf. — Williamsburg, USA, 1988. P. 181.
3. Spindt C. A., Holland C. E., Rosengveen A., Brodic I.: 3rd Int. Vacuum Microelectronic Conf., — Monterey, California, USA, 1990. P. 92.
4. Sugiyama Y., Itoh J., Kanemaru S. Digest of Technical Papers of Transducers, 1993.
5. Wang H. X., Zhu C. C., Liu J. H., Lee X. P. Techn. Digest of the 8th IVMC. — Portland, Oregon, USA, 1995. P. 308.
6. Nicolaescu D., Filip V. Modelling of a magnetic sensor based on vacuum field emitter // Applied Surface Sci., 1996. V. 94/95. P. 87.
7. Fedirko V. A., Belova N. G. Numerical Modelling of Microvacuum Magnetosensitive Cell-9th Int. Vacuum Microelectronic Conf. — St. Petersburg, Russia, 1996. P. 81.
8. Васичев Б. Н. Синтез электронно-оптических систем с заданной переходной характеристикой для решающих устройств. // Известия АН СССР. Сер. физич., 1993. Т. 57. № 8. С. 131—136; Васичев Б. Н. Переходные характеристики электронно-лучевых решающих устройств: Тез. докл. на Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и информатика". — г. Зеленоград, Россия, ноябрь, 1995; Васичев Б. Н. Разработка вакуумного электронно-лучевого решающего устройства: Тез. докл. на науч.-техн. конф. "Вакуумная техника". — Гурзуф, 1996, сентябрь.
9. Gray H. F. Proc. of the IEEE MTT Symp. on Engineering Microwave Technology, ed. by J. Pierro, 1989. P. 22.
10. Ganguly A. K., Phillips P. M., Gray H. F. // J. Appl. Phys., 1990. V. 67. P. 7968.
11. Белова Н. Г., Федирко В. А. // Прикладная физика. 1997. № 2—3. С. 3745.
12. Shao Z. New lens for a low-voltage scanning electron microscope // Review Scientific Instruments, 1988. № 59(9). P. 1985—1989.
13. Tang T. T., Song J. P. Side pole-gap magnetic electron lenses // Optik, 1990. V. 84. № 3. P. 108—112.
14. Cleaver J. R. A. Field emission electron gun systems incorporating single-pole magnetic lenses // Ibid. 1978/79. V. 52. № 4. P. 293—303.
15. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Розенфельд Л. Б. Электронно-лучевые конфокальные системы // Прикладная физика, 1997. Вып. 2—3. С. 172—179.
16. Захаров А. В., Самарский А. А., Свешников А. Г. Применение метода больших частиц к расчету движения заряженного пучка в электромагнитном поле с учетом пространственного заряда пучка: В кн. Вычислительные методы и программирование. Вып. 16. — М.: Изд-во МГУ, 1971. С. 225—243.
17. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Розенфельд Л. Б. // Изв. АН СССР. Сер. физич., 1988. Т. 52. С. 1269.
18. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Розенфельд Л. Б., Чернова-Столярова Е. Е. // Там же, 1991. Т. 55. С. 1863.
19. Васичев Б. Н., Михальцов Е. П., Розенфельд Л. Б., Чернова-Столярова Е. Е. // Там же, 1993. Т. 57. С. 106—109.
20. Васичев Б. Н., Розенфельд Л. Б., Михальцов Е. П. // Wide-angle optics: пакет программ для моделирования электронно- и ионно-лучевых аксиально-симметричных систем, содержащих непараксиальную широкоугольную и иммерсионную оптику с наложенными электрическими и магнитными полями // Прикладная физика. Вып. 2—3. С. 166—168.

ELECTRON BEAM COMPUTERS BASE ON MICROVACUUM CELLS

B. N. Vasichev

Research Institute for Electron and ion optics, Moscow, Russia

Mathematical and physical model is developed for the a cylindrical multi-electrodes microvacuum cells have submicron size. An applid program package for precise calculation of trajectories in the magnetic axial and nonaxial fields. Present original electromagnetic electron-optic cell for microcomputers.