

УДК 621.385.833

МАГНИТНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЛИНЗА С СИНТЕЗИРОВАННЫМ ПОЛЕМ

В. Н. Балашов

Московский государственный институт электроники и математики
(Технический университет), Москва, Россия

Предложена концепция построения магнитной электронной линзы с синтезированным полем, представляющая собой обобщение концепции электронной линзы с подвижной оптической осью.

Развитие технологии микроэлектроники ставит задачу создания объемных (трехмерных) интегральных микросхем, поверхность технологических слоев которых имеет сложный и глубокий рельеф. Существующее литографическое оборудование, рассчитанное на планарную технологию, не позволяет создавать рисунок топологии технологических слоев таких микросхем. Задача формирования рисунка топологии трехмерных интегральных схем может быть решена с помощью электронно-литографических установок нового поколения, обладающих возможностью не только экспонировать элементы топологии электронным пучком, но и изменять положение плоскости фокусировки и угол падения пучка на мишень.

Основу конструкции электронно-оптической системы (ЭОС) литографической установки нового поколения составляет объективная система на основе магнитной электронной линзы с синтезированным полем, являющейся обобщением концепции электронных линз с подвижной оптической осью.

Зададим в качестве криволинейной оптической оси объективной системы произвольную достаточно гладкую кривую $v = v(z)$, $w = w(z)$, соединяющую геометрическую ось части ЭОС, формирующей электронный пучок, и точку экспонирования на поверхности микросхемы с координатами z_1 , $v(z_1)$ и $w(z_1)$ (z_1 — координата плоскости изображения объектов системы). Производные $v'(z_1)$ и $w'(z_1)$ определяют угол падения пучка на мишень.

Для реализации движения электронного пучка вдоль этой криволинейной оптической оси необходимо согласовать фокусирующие и отклоняющие поля в объективной системе. Необходимое распределение отклоняющегося поля в точках криволинейной оси находится по формулам [1]

$$\begin{aligned}
 B_x(z, v, w) &= -\frac{w''}{\lambda} + B_z^*(z, v, w)v' + \frac{1}{2} B_z^{*'}(z, v, w)v; \\
 B_y(z, v, w) &= -\frac{v''}{\lambda} + B_z^*(z, v, w)w' + \frac{1}{2} B_z^{*'}(z, v, w)w,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\lambda = \sqrt{2e / mU}$; U — ускоряющее напряжение; e и m — заряд и масса электрона соответственно; $B_z^*(z, v, w)$ — скорректированное распределение фокусирующего поля в точках криволинейной оси, совпадающее с распределением поля на геометрической оси линзы [1].

Согласование полей фокусирующей линзы и дефлектора в соответствии с соотношениями (1) обеспечивает необходимые параксиальные характеристики объективной системы. Однако в окрестности криволинейной оси $v(z)$, $w(z)$ суммарное магнитное поле не является осесимметричным и поэтому не обеспечивает высококачественную фокусировку электронного пучка.

Коррекция локальной осевой симметрии поля в окрестности криволинейной оптической оси проводится с помощью мультипольного корректора, поле которого также должно быть согласовано с полями дефлектора и фокусирующей линзы.

В качестве дефлектора, формирующего криволинейную оптическую ось линзы, выберем дефлектор тороидальной конструкции без магнитного сердечника, помещенный в канале фокусирующей линзы. Рабочие части витков обмотки дефлектора размещены на образующей цилиндра радиуса R , при этом закон изменения тока возбуждения по длине обмотки подбирается путем изменения количества проводников, их длины и положения на образующей цилиндра, а по азимутальной координате φ — принимается косинусоидальным.

Необходимое распределение тока возбуждения по длине образующей цилиндра дефлектора находится по формуле, следующей из формулы (7) работы [2]

$$j_z(\omega) = -\frac{B_0(\omega)I_1(\omega\sqrt{v^2+w^2})}{i\omega I_0(\omega\sqrt{v^2+w^2}) \frac{R \sin^2 \varphi K_1(\omega P(v, w))}{P(v, w)}}, \tag{2}$$

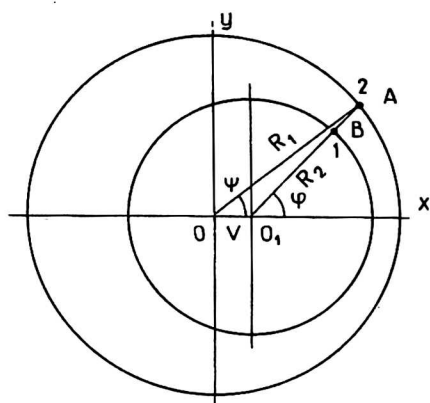
где $j_z(\omega)$ — преобразование Фурье тока; $B_0(\omega)$ — преобразование Фурье поля $B_z^*(z, v, w)$; R — радиус цилиндрической поверхности обмотки дефлектора; $I_0(\cdot)$, $I_1(\cdot)$ — модифицированные функции Бесселя; $K_1(\cdot)$ — функция Макдональдса; φ — азимутальный угол; $P(v, w) = \sqrt{(v - R \cos \varphi)^2 + (w - R \sin \varphi)^2}$.

Вычисляя обратное преобразование Фурье от найденного по формуле (2) распределения методом регуляризации [2, 4], найдем необходимое распределение тока возбуждения $j_z(z, R, \varphi)$ по длине образующей цилиндра радиуса R .

Заметим, что ось локальной симметрии поля в дефлекторе, формирующем подвижную криволинейную ось линзы, совпадает с осью $v(z)$, $w(z)$, а не с геометрической осью обмотки дефлектора.

Для коррекции локальной осевой симметрии поля в окрестности криволинейной оси найдем гармоники Фурье по азимутальной координате суммарного поля фокусирующей линзы и дефлектора в окрестности криволинейной оси [1, 3]. Вторая и более высокие гармоники радиального поля характеризуют степень нарушения осевой симметрии и должны быть скомпенсированы с помощью мультипольного корректора поля.

Рассмотрим вспомогательный магнитный мультиполь, выполненный по неавтополюсной схеме с рабочей частью витков обмотки возбуждения, расположенных вдоль образующей цилиндра радиуса R_2 (рисунок).



Геометрические соотношения в мультипольном корректоре линзы с синтезированным полем

Распределение индукции магнитного поля в окрестности оси мультиполя определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} B_{xN} &= B_{rN}(z)r^N \cos N \varphi \cos \varphi; \\ B_{yN} &= B_{rN}(z)r^N \cos N \varphi \sin \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где N — порядок мультиполя; $B_{rN}(z)$ — одна из гармоник Фурье суммарного поля.

Векторный потенциал поля в точке с координатами (x, y, z) , создаваемый током $j_{zN}(z)$, проходящим по образующей цилиндра с координатами (R_2, φ) , определяется интегралом Пуассона.

$$A_{zN}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{j_{zN}(s) \cos N\varphi ds}{\sqrt{(x - R_2 \cos \varphi)^2 + (y - R_2 \sin \varphi)^2 + (z - s)^2}}. \quad (4)$$

Так как необходимое распределение индукции поля (3) и, следовательно, распределение векторного потенциала A_{zN} заданы, будем рассматривать (4) как интегральное уравнение относительно неизвестного распределения тока $J_{zN}(z)$ [2]. Вычисляя преобразование Фурье от левой и правой частей, получим

$$A_{zN}(\omega) = J_{zN}(\omega)K(\omega), \quad (5)$$

где $J_{zN}(\omega)$ и $A_{zN}(\omega)$ — преобразования Фурье тока и векторного потенциала; $K(\omega) = -\frac{\mu_0}{2} K_0(\omega) \sqrt{(x - R_2 \cos(\varphi))^2 + (y - R_2 \sin(\varphi))^2}$ — преобразование Фурье ядра.

Дифференцируя (5) по параметру y установим связь между преобразованиями Фурье компоненты вектора индукции поля $B_{zN}(z)$ и тока $J_{zN}(z)$.

$$J_{zN}(\omega) = -B_{zN}(\omega) / \frac{\partial K(\omega)}{\partial y}.$$

Для назначения гармоники Фурье индукции поля на оси $x = 0, y = 0$ и тока возбуждения с координатами $(R_2, \varphi = 0)$ получим следующее выражение

$$J_{zN}(\omega) = \frac{2B_{zN}(\omega)}{\mu_0 K_1(\omega R_2) \omega}.$$

Вычисляя обратное преобразование Фурье методом регуляризации [2, 4], найдем необходимое распределение тока по длине обмотки, а затем, учитывая распределение тока по азимутальной координате, окончательно запишем выражение для необходимого распределения тока в обмотке вспомогательного мультиполя.

$$j_{zN}(z, R_2, \varphi) = j_{zN}(z, R_2, 0) \cos N\varphi.$$

Пересчитаем распределение тока в обмотке вспомогательного осесимметричного мультиполя радиусом R_2 в распределение тока в рабочей обмотке мультиполя с радиусом R_1 , ось которого сдвинута по оси x на величину y (см. рисунок). Если радиусы R_1 и R_2 близки по величине, а $v \ll R_1$, то с достаточно высокой точностью можно считать, что соответствующие токи 1 и 2 отличаются только на коэффициенты k , который можно найти из закона Био-Савара, например, в точке $z = 0, \varphi$.

$$\int \frac{j_{zN}(s) ds}{\sqrt{R_2^2 + s^2}} = k(\varphi) \int \frac{j_{zN}(s) ds}{\sqrt{R_3^2 + s^2}},$$

где $R_3 = OA_1 = \sqrt{R_1^2 - v^2 \sin^2 \varphi} - v \cos \varphi$ (см. рисунок).

Угловое распределение тока в обмотке рабочего и вспомогательного мультиполей связаны следующей формулой, полученной из геометрических соотношений (см. рисунок)

$$\sin \varphi = R_3(\varphi) \sin \varphi / R_1.$$

Приведенные решения задач синтеза позволяют установить связь между заданной функцией $v(z), w(z)$, определяющей криволинейную оптическую ось линзы, и необходимыми распределениями рабочих компонент тока возбуждения в дефлекторе формирования криволинейной оси и корректирующем мультиполе магнитной электронной линзы с синтезированным полем. Полученные выражения, в отличие от теории линзы с подвижной оптической осью [2], являются приближенными. Однако точность приближения достаточна для решения практических задач, что связано с характерными для электронной оптической оси, не превышающими сотых долей радиана.

Полученные в результате решения задач синтеза распределения тока аппроксимируются набором рамок тороидальных обмоток дефлектора и мультишля, а затем конструкция линзы уточняется путем обычного расчета, моделирования и оптимизации на основе точного расчета полей, траекторий и aberrаций [5].

Литература

1. Балашов В. Н. Нелинейная теория электронной линзы с криволинейной оптической осью. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1993. Т. 57, № 8. С. 110—114.
2. Балашов В. Н. Проектирование электронных линз с подвижной оптической осью путем решения обратных задач. // Там же, 1966. Т. 60. № 2. С. 168—173.
3. Балашов В. Н., Васьчев, Б. Н. Перспективы создания электронно-литографического оборудования для производства заказных интегральных микросхем // Прикладная физика, 1966. № 3. С. 55—60.
4. Тихонов А. Н., Арсенин И. Я. Методы решения некорректных задач — М.: Наука, 1979. — 285 с.
5. Балашов В. Н., Трофимов В. А., Шахбазов С. Ю. Метод расчета ошибок изображения электронно-оптических систем любой сложности // Изв. РАН. Сер. Физ. 1993. Т. 57. № 8. С. 127—130.

MAGNETIC ELECTRON BEAM LENS WITH THE SYNTHESIZIC FIELD

V. N. Balashov

Moscow State Institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

The suggestion of a new way of building magnetic electron beam lens with the synthesizic field which is the summing up of the theory of electron beam lens with the moving optical axis.