

УДК 537.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОКУСИРУЮЩЕЙ МИКРОЛИНЗЫ ДЛЯ ОЖЕ-АНАЛИЗАТОРА С ЦЗА

© 2013 г. М. Д. Бельский, Б. Г. Львов, В. В. Рыбалко

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ

E-mail: mikhael-b@rambler.ru

Изложены методика и результаты моделирования пленочной зондоформирующей линзы, удовлетворяющей жестким массо-габаритным требованиям и предназначенной для использования в составе оже-анализатора с ЦЗА. Получены оптимизированные, электронно-оптические характеристики линзы (распределение рабочих потенциалов, геометрия электродного пространства).

DOI: 10.7868/S0367676513080061

Создание бортового аналитического комплекса (БАК) для космических исследований требует решения ряда задач, не являющихся приоритетными в традиционном приборостроении, в частности миниатюризация отдельных узлов и систем в целом. Сказанное в полной мере относится к модулю оже-анализа, входящему в состав БАК.

Наиболее часто в оже-анализаторах применяют электронно-оптические системы, построенные с использованием цилиндрических зеркальных анализаторов (ЦЗА), обладающих рядом преимуществ, по сравнению с другими типами анализаторов. Приемлемое значение относительного разрешения (лучше 0.2%) в ЦЗА сочетается с высокой эффективностью сбора вторично-эмиссионного сигнала [1]. При этом максимальная эффективность достигается при соосном размещении анализатора и системы фокусировки электронного зонда, причем фокусирующая система должна не только обеспечивать заданную геометрию и плотность тока в пучке, но и обладать малыми массогабаритными характеристиками. Такими характеристиками потенциально обладают пленочные линзы [2], однако их геометрия, конструктивное исполнение требуют оптимизации по ряду параметров: это и технология изготовления, и число электродов, и геометрические соотношения в комбинации с подаваемыми потенциалами, обеспечивающими приемлемые распределения полей.

В качестве базового узла миниатюрной электронно-оптической системы рассматривалась пленочная линза с дисковыми коаксиальными электродами, которая может быть выполнена с учетом возможностей кремниевой планарной технологии. Выбранная для макетирования опытных образцов технология основана на формировании электродов в пленочных слоях низкоомного кремния и удовлетворяет требованиям максимальной простоты и технологичности проектируемой системы.

Моделированию подвергались линзы с числом электродов от 3 до 6, рассчитанные на фокусировку электронных пучков с энергией в диапазоне единиц кэВ. Согласно свойствам диэлектриков, используемых в планарной кремниевой технологии, предельное значение напряженности поля в линзе не выше $10 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$.

При постановке задачи, было сформулировано условие унификации возможных конструктивных вариантов микролинз, поэтому основное внимание уделено диафрагменным микролинзам, описываемым двумя проектными переменными: межэлектродным расстоянием и диаметром отверстий. Оптимальные соотношения диаметров и межэлектродных расстояний для разных условий фокусировки могут служить основой для построения рационального ряда типоразмеров линз.

В самом общем виде задача оптимального проектирования формулируется как задача нахождения конфигурации электродов, удовлетворяющей определенным геометрическим ограничениям и обеспечивающей, при подаче соответствующих потенциалов, наилучшее качество фокусировки пучка в заданных условиях функционирования. Условия функционирования включают параметры источника, рабочие отрезки, требуемый уровень тока, ускоряющее напряжение, предельно допустимую напряженность поля. Геометрические ограничения касаются формы электродов и характерных внутренних размеров.

В настоящей работе область поиска оптимальных решений ограничена микролинзами, состоящими из тонких диафрагм с круглыми отверстиями. При этом процедура сводится к последовательному добавлению диафрагм и определению диаметров отверстий, межэлектродных расстояний и потенциалов, при которых достигаются предельные выходные характеристики пучка: либо минимальный радиус при заданном токе, либо

Таблица 1. Влияние относительного расстояния ΔZ между диафрагмами на величину относительной погрешности δ вычисления поля

$\frac{\Delta z}{R_2 - R_1}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta \cdot 10^4$	-116.104	-36.9	-16	-8.29	-4.83	-3.06	-2.05	-1.44	-1.05

максимальный ток при заданном радиусе, либо абсолютный минимум пятна фокусировки.

В основе оптимизации лежат разные зависимости слагаемых, определяющих поперечный размер зонда, от геометрических параметров линзы.

Радиус зонда (пятна фокусировки) принято определять квадратичной суммой

$$r^2 = r_{\text{гаус}}^2 + \delta r_{\text{дифр}}^2 + \delta r_{\text{сф}}^2 + \delta r_{\text{хр}}^2 \quad (1)$$

радиусов гауссова изображения $r_{\text{гаус}} = Mr_0$, aberrационных дисков – сферической $\delta r_{\text{сф}} = MC_{\text{сф}}\alpha_0^3$ и хроматической aberrации $\delta r_{\text{хр}} = MC_{\text{хр}}\alpha_0 \frac{\Delta U}{U_0}$ и дифрак-

ционного размытия $\delta r_{\text{дифр}} = \frac{0.75M}{\alpha_0 \text{ (рад)} \sqrt{U_0 \text{ (В)}}}$ (нм)

(r_0 – радиус виртуального источника, M – линейное увеличение линзы, α_0 – полуугол апертуры пучка, $e\Delta U$ – энергетический разброс электронов, U_0 – потенциал электрического поля в области источника).

В качестве генератора электронного пучка предполагается использовать пушку с полевым катодом. Ток зонда с заданной угловой яркостью $dI/d\Omega_0$ оценивался как $I = \pi\alpha_0^2 dI/d\Omega_0$ в соответствующем телесном угле $\Omega_0 = \pi\alpha_0^2$.

Коэффициенты сферической и хроматической aberrаций выражались известными интегралами [3]

$$C_{\text{сф}} = \frac{1}{32} \int_{z_0}^{z_n} \sqrt{\frac{U}{U_0}} h^4 \left\{ \left(\frac{U'}{U} \right)^2 \left[\frac{h'}{h} + \frac{5U'}{6U} \right]^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{U''}{U} + \frac{U'h'}{U'h} - \left(\frac{U'}{U} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{U'}{U} \right)^2 \left(\frac{h'}{h} + \frac{5U'}{6U} \right)^2 + \frac{1}{36} \left(\frac{U'}{U} \right)^4 + \left[\left(\frac{U''}{U} + \frac{U'h'}{U'h} \right) - \frac{5}{4} \left(\frac{U'}{U} \right)^2 \right]^2 \right\} dz, \quad (2)$$

$$C_{\text{хр}} = \frac{3}{8} \int_{z_0}^{z_n} \sqrt{\frac{U_0}{U}} h^2 \left(\frac{U'}{U} \right)^2 dz, \quad (3)$$

где $h(z)$ – фундаментальное решение параксиального траекторного уравнения, удовлетворяющее граничным условиям $h(z_0) = 0, h'(z_0) = 1, h(z_{n+1}) = 0$ (z_0, z_{n+1} – осевое положение источника и плоско-

сти фокусировки), $U(z)$ – осевое распределение потенциала.

Поле n -электродной линзы рассматривалось как сумма полей бесконечно тонких заряженных диафрагм. При этом возможна аналитическая аппроксимация поля, дающая для осевого распределения потенциала выражение

$$U(z) = \frac{U_0 + U_{n+1}}{2} + \frac{E_0 z_1 + E_n z_n}{2} - \frac{E_0 + E_n}{2} z - \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{i-1}) \left((z - z_i) \arctg \frac{2(z - z_i)}{d_i} + \frac{d_i}{2} \right), \quad (4)$$

где U_i, z_i, d_i ($i = 1, \dots, n$) – потенциал, осевая координата и диаметр отверстия i -го электрода; U_0 – потенциал в источнике, U_{n+1} – в плоскости изображения (фокусировки); $E_i = \frac{U_i - U_{i+1}}{z_{i+1} - z_i}$ – однородная составляющая напряженности поля, примыкающего к i -му электроду справа.

Погрешности, возникающие при использовании обоих выше отмеченных приближений были

оценены и результаты оценки приведены в табл. 1 и на рис. 1. Из табл. 1 видно, что уже при расстоянии ΔZ между диафрагмами, в 5 раз большем, чем разница радиусов отверстий диафрагм $R_2 - R_1$, погрешность вычисления поля $\sim 10^{-3}$, а при соотношении около 10 погрешность оказывается на уровне 10^{-4} .

Из рис. 1 следует, что для толщин диафрагм порядка нескольких микрон отклонение не

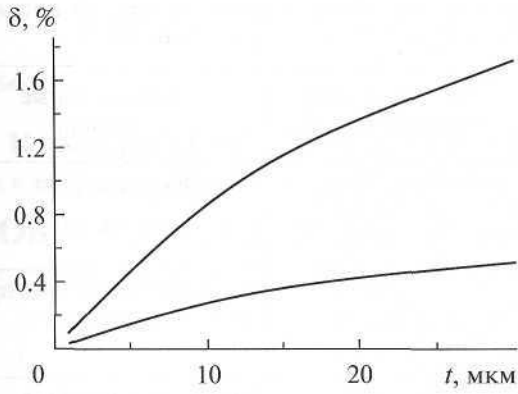


Рис. 1. Влияние толщины t диафрагмы на величину отклонения δ осевого потенциала от рассчитанного методом конечных элементов для тонких диафрагм (верхняя кривая) и для диафрагм, толщина которых имитировалась парой тонких электродов (нижняя кривая).

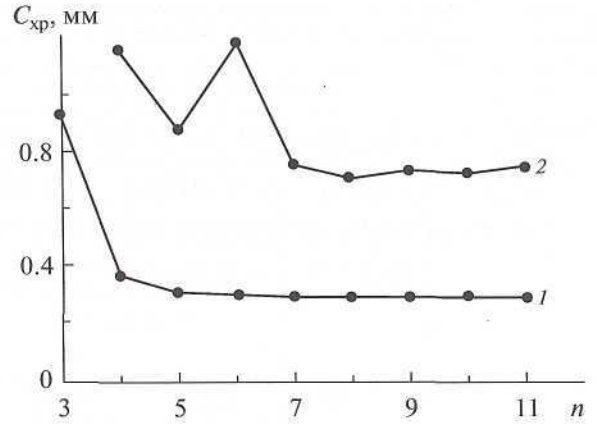


Рис. 2. Изменение коэффициента C_{xp} хроматической aberrации при увеличении количества n электродов линзы. Кривая 1 построена без учета ограничения по электрической прочности межэлектродных промежутков, выполненных по Si-планарной технологии, 2 – с учетом ограничения.

превышает десятых долей процента. Что касается толщин диафрагм нескольких десятков микрон, то тут достаточно хорошее приближение дает пара тонких диафрагм.

Изучение влияния числа диафрагм в линзе на ее электронно-оптические характеристики, показало, что оптимальное количество электродов – 5. В качестве примера на рис. 2 приведен характер влияния числа электродов в линзе на ее хроматическую aberrацию. Дальнейшее увеличение

электродов значительно усложняет ее изготовление, но не приводит к заметному улучшению параметров.

Результаты моделирования приведены в табл. 2–4.

Из табл. 2 видно, что добавление пятого электрода позволяет улучшить параметры линзы примерно в 1.5–2 раза по сравнению с 4-электродными.

Полученные данные позволяют утверждать, что наиболее предпочтителен вариант 5-электродной

Таблица 2. Характеристики оптимизированных в отношении хроматической aberrации 4- и 5-электродных линз с одинаковыми межэлектродными расстояниями. Потенциалы первого U_1 и последнего U_n электродов $U_1 = U_n, d_i/L_0 = 0.05, E < E_{пр} = 10 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$

Число электродов n	Минимизируемая функция			M	Управляемые параметры $U_i/U_1, \text{кВ}$	Специальные условия оптимизации
	$C_{xp}, \text{мм}$	$MC_{xp}, \text{мм}$	$M^2C_{xp}, \text{мм}$			
4	1.15	2.48	5.28	2.14	$U_2 = 4.05$ $U_3 = 0.72$	Максимальный ток зонда
	1.15	2.48	5.28	2.14	$U_2 = 4.05$ $U_3 = 0.72$	Минимальный зонд при заданном токе
	1.15	2.48	5.28	2.14	$U_2 = 4.05$ $U_3 = 0.72$	Минимальный зонд
5	0.87	1.98	3.60	2.03	$U_2 = 3.50$ $U_3 = 1.05$ $U_4 = 2.70$	Максимальный ток зонда
	0.95	1.58	2.62	1.66	$U_2 = 3.50$ $U_3 = 1.44$ $U_4 = 3.50$	Минимальный зонд при заданном токе
	0.95	1.58	2.62	1.66	$U_2 = 3.50$ $U_3 = 1.44$ $U_4 = 3.50$	Минимальный зонд

Таблица 3. Характеристики оптимизированной в отношении сферической aberrации 5-электродной линзы с эквидистантным расположением электродов. $U_1 = U_5$, $L_d/L_0 = 0.25$, $d_i/L_0 = 0.05$, $E < E_{пр} = 10 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$

Число электродов n	Минимизируемая функция			M	Управляемые параметры U_i/U_1	Специальные условия
	$C_{сф}$, мм	$MC_{сф}$, мм	$M^4C_{сф}$, мм			
5	17.20	40.18	512.64	2.33	$U_2 = 3.34$ $U_3 = 0.84$ $U_4 = 0.46$	Максимальный ток в зонде
	17.28	39.98	495.00	2.31	$U_2 = 3.37$ $U_3 = 0.87$ $U_4 = 0.45$	Минимальный зонд при заданном токе
	46.09	62.56	156.51	1.35	$U_2 = 0.58$ $U_3 = 1.23$ $U_4 = 3.50$	Минимальный зонд

Таблица 4. Характеристики оптимизированной в отношении хроматической aberrации 5-электродной линзы с варьируемыми в пределах $0.1 \leq l_i/L_0 \leq 0.5$ межэлектродными расстояниями

Число электродов n	Минимизируемая функция			M	Межэлектродные расстояния l_i/L_0	Управляемые параметры U_i/U_1	Специальные условия
	$C_{хр}$, мм	$MC_{хр}$, мм	$M^2C_{хр}$, мм				
5	0.74	1.82	2.46	2.46	$l_1 = 0.12$ $l_2 = 0.13$ $l_3 = 0.30$ $l_4 = 0.45$	$U_2 = 2.16$ $U_3 = 0.89$ $U_4 = 3.94$	Максимальный ток зонда
	0.85	1.48	2.54	1.72	$l_1 = 0.21$ $l_2 = 0.15$ $l_3 = 0.29$ $l_4 = 0.35$	$U_2 = 3.09$ $U_3 = 1.59$ $U_4 = 4.50$	Минимальный зонд при заданном токе
	0.98	1.54	2.46	1.58	$l_1 = 0.34$ $l_2 = 0.24$ $l_3 = 0.17$ $l_4 = 0.25$	$U_2 = 4.12$ $U_3 = 1.72$ $U_4 = 3.44$	Минимальный зонд

линзы с одинаковыми межэлектродными расстояниями, позволяющий минимизировать aberrационные характеристики в разных режимах формирования пучка за счет оптимизации внутренних потенциалов.

В заключение следует отметить, что использованная для проведения расчетов методика предоставляет возможность не только выбора оптимальных параметров фокусировки, но и оценки влияния технологических погрешностей изготовления линз на их электронно-оптические характеристики [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко С.И. Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 2. С. 73.
2. Казмирук В.В., Савицкая Т.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 4. С. 485; Kazmiruk V.V., Savitskaja T.N. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2009. V. 73. № 4. P. 461.
3. Монастырский М.А. // Численные методы решения задач электронной оптики. Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1979. С. 108.
4. Бельский М.Д., Лапшинов Б.А., Львов Б.Г. // Прикл. физика. 2006. № 4. С. 78.