

КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА С ПЛОСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Л. П. ОВСЯННИКОВА и М. СИЛАДИ

Физико-Технический Институт им. А. Ф. Иоффе Академии Наук СССР
Кафедра Теоретических Основ Электротехники Будапештского Политехнического
Университета

(Поступило 11. VII. 1969 г.)

Квадрупольные линзы (электрические и магнитные), имеющие плоскую форму электродов (полюсов) (см. рис. 1), обладают целым рядом достоинств. К ним нужно отнести простоту изготовления, а также возможность уменьшения внешних размеров линзы по сравнению, например, с линзами, электроды (полюса) которых имеют гиперболическую или цилиндрическую форму.

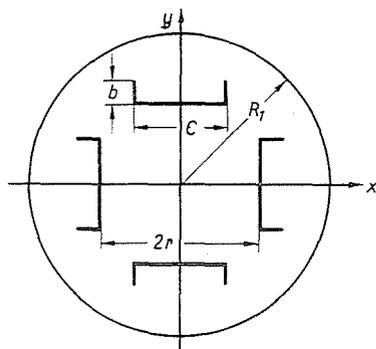


Рис. 1

Выражение для потенциала квадрупольной линзы с произвольной формой электродов (полюсов) в двумерном приближении можно записать следующим образом:

$$\Phi(x, y) = \frac{VK_2}{r^2} \left[x^2 - y^2 + \frac{K_6}{K_2} \frac{1}{r^4} (x^2 - y^2) (x^4 + y^4 - 14x^2y^2) + \dots \right] \quad (1)$$

Здесь K_{4i+2} ($i = 0, 1, 2 \dots$)-коэффициенты, зависящие от формы электродов (полюсов). Линза обладает двумя плоскостями симметрии и двумя плоскостями антисимметрии. Изменение величины коэффициента K_2 вызывает изменение условий фокусировки первого порядка. Подбором значения потенциала $\pm V$ на электродах (полюсах) линзы при том же самом радиусе апертуры r можно скомпенсировать это изменение. Коэффициенты K_{4i+2} ($i = 1, 2 \dots$)

характеризуют скорость изменения градиента напряженности поля по радиусу. Их обычно называют коэффициентами нелинейности поля.

Аналитические выражения для распределения потенциала линзы с плоскими электродами были получены в работах [1] в предположении бесконечно малого зазора между электродами.

Поля линз с плоскими электродами (полюсами) можно рассчитать также с помощью метода конформных отображений, используя теорему Кристоффеля—Шварца [2]. Однако интегралы, определяющие преобразования, нельзя выразить в элементарных функциях и они вычисляются численно. В работах [3, 4] были рассчитаны и измерены поля магнитных линз с плоскими электродами в случае подавленной шестой гармоники поля ($K_6 = 0$).

В статье [5] на примерах электростатической линзы с вогнутыми электродами и магнитной с полюсами в виде частей кругового цилиндра было

Таблица 1

№	R_1/r	c/r	K_2	K_6	K_6/K_2	№	R_1/r	c/r	K_2	K_6	K_6/K_2
1	3,5	1,6	1,089	-0,09	-0,08	4	1,59	1,45	1,092	-0,10	-0,09
		1,2	1,081	-0,08	-0,07			1,27	1,086	-0,09	-0,08
		0,8	1,034	-0,01	-0,01			1,08	1,076	-0,08	-0,07
		0,4	0,890	0,14	0,16			0,91	1,045	0,00	0,00
		0	0,512	0,19	0,37			0,73	1,000	0,05	0,05
2	2,34	1,87	1,093	-0,10	-0,09	5	1,46	1,17	1,077	-0,08	-0,07
		1,60	1,092	-0,10	-0,09			0,80	1,025	0,00	0,00
		1,33	1,088	-0,09	-0,08			0,67	0,973	0,08	0,08
		1,07	1,071	-0,06	-0,06			0,50	0,893	0,17	0,19
		0,80	1,029	0,00	0,00	0,33		0,782	0,22	0,28	
		0,53	0,942	0,10	0,11	0,17		0,624	0,23	0,37	
		0,27	0,781	0,20	0,26	0		0,359	0,34	0,95	
		0	0,456	0,14	0,31	6		1,25	0,71	0,958	0,11
3	1,67	1,52	1,093	-0,11	-0,10		0,57		0,891	0,19	0,21
		1,39	1,086	-0,09	-0,08		0,43		0,802	0,25	0,31
		1,14	1,075	-0,07	-0,07		0,29		0,682	0,28	0,41
		0,95	1,051	-0,03	-0,03		0,14		0,529	0,25	0,47
		0,76	1,008	0,05	0,05	0	0,290	0,15	0,52		
0,57	0,942	0,11	0,12								
0,38	0,835	0,20	0,24								
0,19	0,679	0,21	0,31								
0	0,397	0,13	0,33								

показано, что меняя геометрические характеристики линзы, а следовательно, величину коэффициентов нелинейности поля, можно уменьшить сферическую aberrацию линзы.

В связи с вышесказанным, в данной работе исследуются поля двумерных электростатических квадрупольных линз с плоскими электродами, у которых коэффициенты нелинейности поля K_6 меняются в довольно широких пределах. Определяются геометрические характеристики линз с уменьшенной сферической aberrацией.

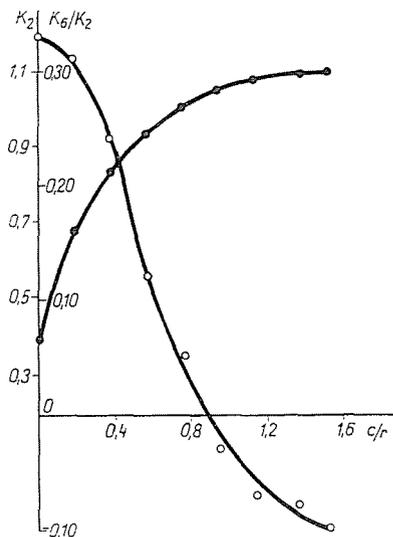


Рис. 2

Измерения проводились на двумерной сетке сопротивлений Кафедры Теоретических Основ Электротехники Будапештского Политехнического Университета. Описание сетки имеется в работах [6, 7]. Моделировалась половина системы, расположенная над осью x , поэтому сопротивления границы сетки, совмещённой с осью x , удваивались. Значения потенциала измерялись по осям x и y . На электроды были поданы потенциалы 1 и 0, при этом потенциал в центре равнялся 0,5 единицы. Для проверки симметрии системы измерялся потенциал вдоль прямой, расположенной под углом 45° к осям x и y . Он был равен с большой степенью точности потенциалу в центре линзы.

На поле внутри линзы влияют граничные условия за электродами. Это влияние становится существенным в случае больших расстояний между электродами. Практически, граничные условия определяются камерой, в которой находится линза. Поэтому граница моделировалась на сетке ступенчатой линией, близкой к окружности. На граничную окружность радиуса R_1 подавался потенциал, равный его значению в центре линзы.

Таблица 2

$\frac{L}{r}$	$\frac{K_6}{K_2}$	$\frac{c}{r}$	$\frac{C_p}{L}$	$\frac{C_s}{L}$	$\frac{C_{p1}}{L}$	$\frac{C_{p2}}{L}$
4	0,152	0,52				
5	0,062	0,72	0,5	0,5	-0,375	-0,375
6	0,030	0,80				
8	0,010	0,86				
5	-0,001	0,88	0,5	0,5	-0,375	0,008
4	0,000	0,88	0,5	0,5	-0,375	0,000

Картина поля снималась для линз с различными величинами R_1/r . При этом отношение ширины полюса к радиусу апертуры c/r менялось от нуля до максимально возможного значения. Для всех линз $b/c = 1/4$.

Экспериментальные результаты обрабатывались с помощью метода наименьших квадратов на машине БЭСМ-4М. При этом для вычисления K_2 выбирались значения потенциала в области от $0,2r$ до $0,7r$, а для вычисления K_6 в области от $0,3r$ до $0,8r$. Полученные значения K_2 , K_6 и K_6/K_2 приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что K_2 при любых значениях R_1/r положительны для всех c/r . Когда $c/r \geq 0,5$, значения K_2 мало меняются с изменением R_1/r . С уменьшением c/r это изменение становится более значительным. Оно максимально при $c/r = 0$. Величины K_6/K_2 начинают отличаться уже при $c/r \approx 0,9$. Когда $c/r \approx 0,80 - 0,90$, K_6/K_2 меняет знак и при малых зазорах между электродами отношение K_6/K_2 становится отрицательным. Если c/r равно максимально возможному значению, то зазор между электродами можно считать малым и значения K_2 и K_6 (см. таблицу 1) получаются близкими к значениям $K_2 = 1,094$ и $K_6 = -0,108$, вычисленным по формулам работы [2]. Исключение составляют случаи, когда $R_1/r = 1,46$ и $1,25$, и максимально возможное значение c/r таково, что зазор между электродами нельзя считать малым.

При $c/r = 0$ получаем значения K_2 , которые хорошо совпадают с результатами работы [8] при $2\varepsilon = 90^\circ$. А именно: когда $R_1/r = 3,5$, мы имеем $K_2 = 0,512$ (см. таблицу 1) и $K_2 = 0,517$ (см. [8]); для $R_1/r = 1,25$ имеем соответственно значения K_2 , равные $0,290$ и $0,286$. Совпадения значений K_6/K_2 оказывается несколько хуже: для $R_1/r = 3,5$ имеем K_6/K_2 , равные $0,37$ (таблица 1) и $0,29$ [8]; для $R_1/r = 1,25$ они, соответственно, равны $0,52$ и $0,49$.

Возможность компенсации каких-либо из коэффициентов сферической aberrации пятого порядка рассмотрим на примере линзы с $R_1/r = 1,67$. На рис. 2 представлены зависимости K_2 (точки) и K_6/K_2 (кружки) от ширины электрода c/r для этого случая.

$\frac{C_{p1} + C_{p2}}{L}$	$\frac{C_{s1}}{L}$	$\frac{C_{s2}}{L}$	$\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L}$	$\frac{C_{t1}}{L}$	$\frac{C_{t2}}{L}$	$\frac{C_{t1} + C_{t2}}{L}$
0	-0,75	-36,1	-36,9	-0,375	824,7	824
-0,383	-0,75	0,750	0	-0,375	-17,13	-17,51
-0,375	-0,75	-0,016	-0,766	-0,375	0,375	0

Из рис. 2 видно, что $K_6/K_2 = 0$ для $c/r = 0,9$, при этом $K_2 = 1,05$.

Определим, при каких геометрических характеристиках этой линзы можно получить уменьшение сферической aberrации. Для этого воспользуемся результатами работы [5]. Выпишем значения K_6/K_2 , при которых корректируется какой-либо из коэффициентов сферической aberrации пятого порядка, и используя данные рис. 2, получим необходимые значения геометрических характеристик. Результаты вычислений приведены в таблице 2. В таблице 2 через C_{p1}/L , C_{s1}/L и C_{t1}/L обозначены коэффициенты сферической aberrации пятого порядка линзы со строго линейным полем, через C_{p2}/L , C_{s2}/L , C_{t2}/L -коэффициенты, связанные с нелинейностью поля. В этой же таблице для сравнения приведены коэффициенты сферической aberrации третьего порядка C_p/L и C_s/L . Параметр L равен расстоянию от предмета до изображения, которые находятся внутри линзы. Выражение для отклонения от параксиальной траектории траектории, вычисленной с точностью до членов пятого порядка малости, в месте расположения гауссова изображения ($z = z_i$) запишется тогда в следующем виде

$$\Delta x(z_i) = C_p x_0'^3 + C_s x_0' y_0'^2 + (C_{p1} + C_{p2}) x_0'^5 + (C_{s1} + C_{s2}) x_0'^3 y_0'^2 + (C_{t1} + C_{t2}) x_0' y_0'^4. \quad (2)$$

Из таблицы 2 следует, что ни при каких значениях K_6/K_2 одновременно обратить в нуль коэффициенты сферической aberrации невозможно. Причём, чем больше отношение L/r , тем при меньших значениях K_6/K_2 происходит коррекция какого-либо коэффициента. Если $C_{p1} + C_{p2} = 0$, то величины остальных коэффициентов возрастают по сравнению с их величинами для строго линейного поля. Если $C_{s1} + C_{s2} = 0$, то возрастает значение коэффициента $C_{t1} + C_{t2}$, а aberrация в средней плоскости остается, практически, неизменной. При $C_{t1} + C_{t2} = 0$ остальные aberrационные коэффициенты почти не изменяются по сравнению с их значениями для строго линейного поля. Это объясняется тем, что $C_{t1} + C_{t2} = 0$ при значении K_6/K_2 , близком к нулю.

Из всего сказанного следует, что выбор K_6/K_2 необходимо связать с формой пучка. Если $x_0' = y_0'$, то лучше выбирать те значения K_6/K_2 , при которых корректируются коэффициенты C_{s1} и C_{t1} , так как $(C_{s1} + C_{s2})$ и $(C_{t1} + C_{t2})$ по величине превосходят $(C_{p1} + C_{p2})$. Однако, в этом случае необходимо иметь в виду, что значения x_0' и y_0' будут малы (траектории в рассеивающей плоскости линзы сильно отклоняются от оси и, следовательно, в образовании изображения принимают участие траектории с малыми y_0'). Поэтому aberrации пятого порядка будут вносить небольшой вклад в общую сумму искажений по сравнению с aberrациями третьего порядка.

Если используется пучок с одинаковыми максимальными отклонениями от оси в плоскостях xoz и $yo z$, то $x_0' = y_0' sh 1/\tau$, то есть $y_0' \ll x_0'$. В таком случае лучше выбирать те значения K_6/K_2 , при которых корректируется коэффициент C_{p1} . Тот же вывод, очевидно, можно сделать и для плоского пучка с $y_0' = 0$. В работе [5] было показано также, что при некоторых отрицательных значениях K_6/K_2 можно уменьшить суммарную величину сферической aberrации третьего и пятого порядков и в плоскости гауссова изображения по сравнению с aberrациями линзы со строго линейным полем ($K_6 = 0$), и для определенных углов на входе в линзу обратить её в нуль. Так, например, в случае пучка заряженных частиц с $x_0' = y_0'$ при $K_6/K_2 = -0,070$ суммарная величина сферической aberrации третьего и пятого порядков в плоскости гауссова изображения меньше, чем её значение для линзы со строго линейным полем при $c/r = 1,14$ и $L/r = 4$. Для $x' = 3^\circ$ величина суммарной aberrации обращается в нуль.

*

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить С. Я. Явор за постоянное внимание к работе и Я. Г. Любчика за помощь в расчётах.

Резюме

В работе исследуются поля двумерных электростатических квадрупольных линз с плоскими электродами, у которых коэффициенты нелинейности поля K_6 меняются в довольно широких пределах. Определяются геометрические характеристики линз с уменьшенной сферической aberrацией.

Литература

1. Bernard, M. Y.: *Annales de Physique*, **9**, 633 (1954)
Лебедев, Н. Н., Скальская, И. П., Уфлянд, Я. С.: Сборник задач по математической физике. М., Гостехиздат, 1955
2. Лаврентьев, М. А., Шабаш, Б. В.: Методы теории функций комплексного переменного. М. Физматиздат, 1958
3. Плотников, В. К.: Приборы и техника эксперимента, **2**, 29 (1962); **1**, 32 (1966)
4. Данильцев, Е. Н., Плотников, В. К.: Приборы и техника эксперимента, **3**, 20 (1963)
5. Овсянникова, Л. П., Чечулин, В. Н., Явор, С. Я.: Изв. АН СССР сер. физ., **32**, 6 (1968)
6. Фишкова, Т. Я., Силади, М., Явор, С. Я.: Радиотехника и Электроника, **12**, 1311 (1967)
7. Fiszkoва, T. Ya., Snyrak, E. V., Szilágyi, M., Yavor, S. Ya.: *Periodica Polytechnica, Electrical Engineering* **12**, 301 (1968)
8. Силади, М., Шпак, Е. В., Явор, С. Я.: Радиотехника и Электроника, **13**, 1, 185 (1968)

Л. П. Овсянникова, Ленинград К-21, Политехническая ул. 26., СССР.
Dr. Miklós SZILÁGYI, Budapest XI., Egrý József u. 18—20, Hungary