

10; 12

© 1990 г.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИММЕРСИОННЫХ СКРЕЩЕННЫХ ЛИНЗ

*Л. А. Баранова, Р. А. Бубляев, С. Я. Явор*

Одиночные скрещенные линзы нашли широкое применение в различных отраслях электронного приборостроения и в технике физического эксперимента: в электронно-лучевых приборах, в источниках ионов и при транспортировке пучков заряженных частиц средних энергий. Достоинствами этих линз является малый уровень aberrаций, сравнительно большая оптическая сила, высокая технологичность, малый продольный размер. К настоящему времени их электронно-оптические свойства достаточно хорошо изучены, основные результаты суммированы в [1].

Во многих прикладных задачах возникает необходимость в изменении энергии пучка заряженных частиц. Этому требованию можно удовлетворить с помощью скрещенных линз, работающих в иммерсионном режиме. Однако оптические свойства иммерсионных скрещенных линз до настоящего времени почти не изучены. В данной работе проведено экспериментальное исследование двух- и трехэлектродных иммерсионных скрещенных линз в астигматичных и стигматичных режимах.

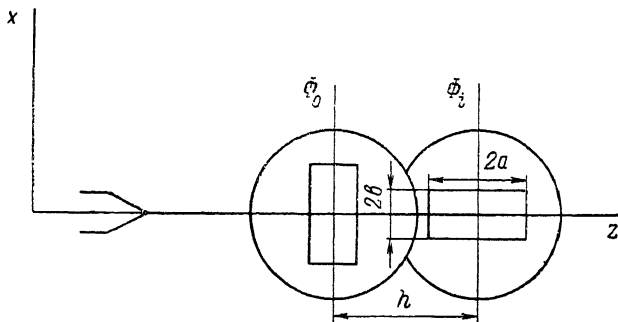


Рис. 1. Иммерсионная скрещенная линза из двух электродов.

Так же как и осесимметричные, простейшие иммерсионные скрещенные линзы состоят из двух электродов. Электроды представляют собой плоские пластины с вытянутыми отверстиями, имеющими две плоскости симметрии. Форма отверстий, как правило, прямоугольная (рис. 1). В соседних электродах отверстия повернуты относительно друг друга на  $90^\circ$ . Такая линза существенно астигматична, т. е. создает линейное изображение точечного объекта. При ускоряющем потенциале на последнем электроде такая линза формирует линейное изображение, параллельное оси  $x$  (фокусирует в направлении оси  $y$ ). При замедляющем потенциале создается линейное изображение, параллельное оси  $y$ . Оптическая сила скрещенной линзы, как правило, больше оптической силы осесимметричной линзы и в основном определяется разностью поперечного и продольного размеров отверстий в электродах.

Расчет скрещенных линз достаточно сложен, поскольку поля их существенно трехмерны. Поэтому в настоящей работе проводилось экспериментальное ис-

следование иммерсионных линз на электронно-оптической скамье. Для этой цели скамья была разделена на две части, находящиеся под разными потенциалами. За линзой, соосно с ней, вплоть до экрана расположены металлические цилиндры, электрически соединенные с последним электродом. Первый электрод линзы, так же как и анод электронной пушки, заземлен. Измерительные сетки имеют потенциал того пространства, в котором они расположены. Металлические цилиндры изготовлены таким образом, что могут надвигаться один на другой, позволяя изменять расстояния от линзы и сетки до экрана.

Обработка результатов измерений проводилась двумя способами. Первый способ широко известен. Он базируется на измерениях параметров линзы (линейного увеличения  $M$  и положения изображения  $Q$ ) в двух различных ее положе-

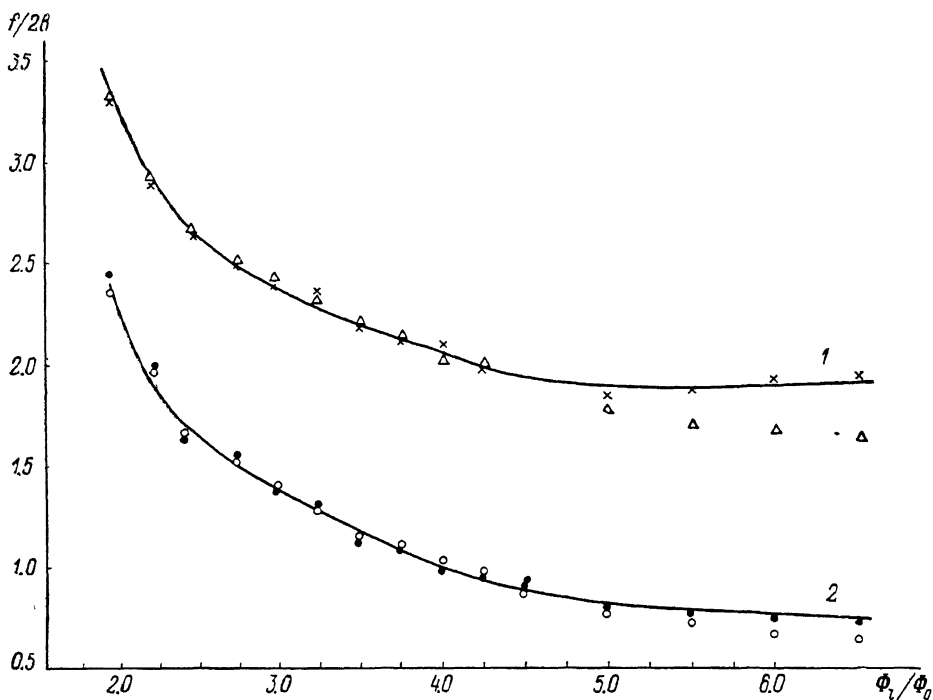


Рис. 2. Фокусные расстояния в собирающей плоскости двухэлектродной иммерсионной линзы.

1 —  $f_i/2b$ , 2 —  $f_0/2b$ .

ниях относительно источника электронов [2]. На основании полученных данных рассчитываются фокусные расстояния  $f_0$ ,  $f_i$  и положения фокусов  $z(F_0)$ ,  $z(F_i)$  или главных плоскостей  $z(H_0)$  и  $z(H_i)$ . Индекс нуль относится к предметному пространству, индекс  $i$  — к пространству изображений.

Второй способ определения кардинальных элементов является приближенным. Он основан на предположении, что главные плоскости линзы близки между собой и их можно считать совпадающими. Такое предположение выполняется тем точнее, чем слабее линза. При этом в одиночной линзе главные плоскости совпадают с ее центром, а в иммерсионной сдвинуты относительно него. При выводе формул было использовано известное соотношение между фокусными расстояниями иммерсионной линзы

$$f_i = f_0 \sqrt{\Phi_i/\Phi_0} \quad (4)$$

где  $\Phi_0$  — потенциал пространства предметов,  $\Phi_i$  — потенциал пространства изображения.

Таким образом, вместо четырех неизвестных мы имеем только два ( $f_0$  и  $z(H)$ ), для их определения можем ограничиться измерениями  $M$  и  $Q$  только в одном положении линзы. При этом расчетные формулы приобретают вид

$$f_0 = \frac{P + Q}{(1 + M)(1/M + \sqrt{\Phi_i/\Phi_0})}, \quad (2)$$

$$z(H) = P - \frac{f_0}{M}(1 + M), \quad (3)$$

где  $z(H_0) = z(H_i) = z(H)$ .

Описанная методика была применена к обработке измерений двухэлектродных скрещенных линз. Отверстия в электродах имели прямоугольную форму с отношением сторон  $a/b=2$ , расстояние между электродами составляло  $h=b$ . Методом двух сеток измерялось положение изображения и увеличение.

Кардинальные элементы двухэлектродной линзы, полученные на основании первого и второго способов, приведены на рис. 2—4. На рис. 2 даны фокусные

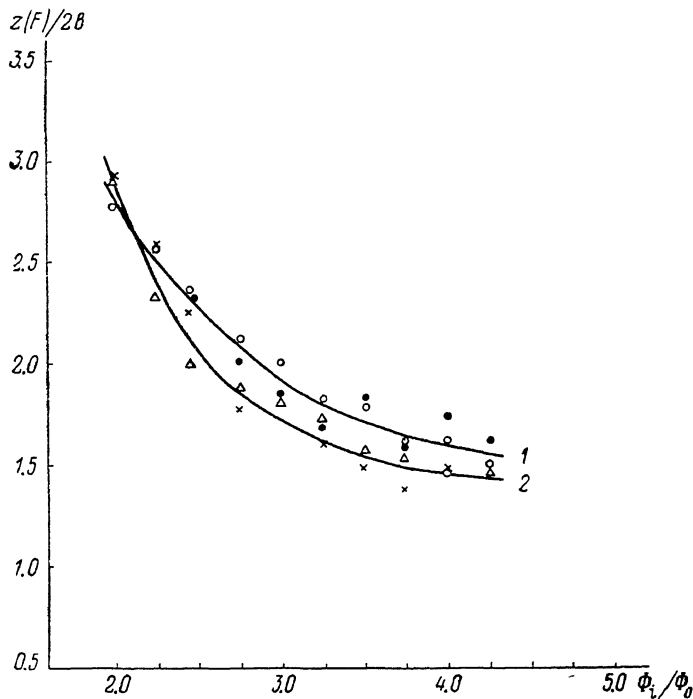


Рис. 3. Положение фокусов в собирающей плоскости двухэлектродной иммерсионной линзы.

1 —  $z(F_0)/2b$ , 2 —  $z(F_i)/2b$ .

расстояния, а на рис. 3 — положения фокусов в зависимости от отношения потенциалов на электродах для собирающей плоскости линзы. Все линейные величины отнесены к ширине отверстия в электроде  $2b$ . Кружки и треугольники соответствуют расчетам по приближенным формулам (2) и (3), точки и крестики получены по формулам, приведенным в [2]. Кружки и точки относятся к предметному пространству, крестики и треугольники — к пространству изображения. Точные и приближенные расчеты фокусных расстояний хорошо согласуются между собой в области небольших ускорений ( $\Phi_i/\Phi_0 \leq 4.5$ ). При больших ускорениях приближенные формулы дают более короткие фокусные расстояния.

Как видно из рис. 2 и 3, разброс точек, определяющих положения фокусов, больше, чем точек, определяющих фокусные расстояния, так как положения фокусов находятся в эксперименте с меньшей точностью. Из приведенных данных нетрудно определить положения главных плоскостей. В собирающей плоскости они сдвинуты от геометрического центра линзы в сторону предмета.

Результаты измерения фокусных расстояний иммерсионной скрещенной линзы в рассеивающей плоскости даны на рис. 4. Измерения здесь представляют большую трудность, поскольку мнимое изображение находится дальше

от экрана и точность определения его положения уменьшается. Это в первую очередь сказывается на определении положения фокусов (соответственно главных плоскостей). В измеренном диапазоне потенциалов линзы главные плоскости смещены от геометрического центра в пространстве изображений на одну-две ширины апертуры.

При одинаковых потенциалах фокусные расстояния в рассеивающей плоскости по абсолютной величине больше, чем в собирающей, т. е. оптическая сила линзы меньше. Это объясняется тем, что поле скрещенной линзы можно рассматривать как сумму осесимметричной и квадрупольной составляющих, причем в собирающей плоскости их оптические силы суммируются, а в рассеивающей вычитаются. С ростом ускорения оптическая сила осесимметричной составляющей растет быстрее, чем квадрупольной. При больших ускорениях ( $\Phi_0/\Phi_0 > 15$ ) исследованная иммерсионная линза становится собирающей в обоих направлениях, однако так как оптические силы в этих направлениях различны, то пучок, формируемый линзой, остается астигматичным. При переходе от фокусировки в одной плоскости к пространственной фокусировке на экране можно последовательно наблюдать два линейных взаимно перпендикулярных изобра-

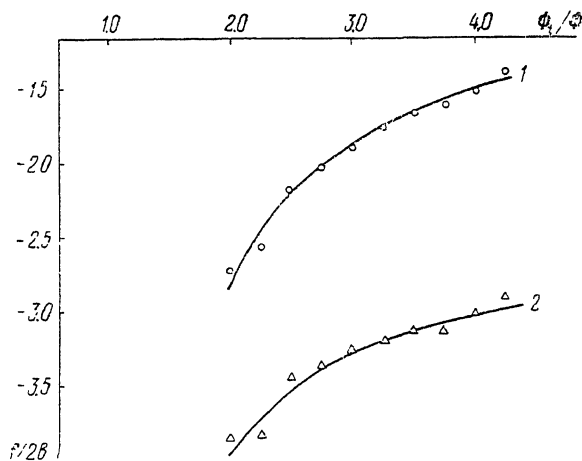


Рис. 4. Фокусные расстояния в рассеивающей плоскости двух-электродной иммерсионной линзы.

1 —  $f_0/2b$ , 2 —  $f_1/2b$ .

жения. Было проведено сравнение полученных данных с результатами численного расчета двухэлектродной скрещенной линзы [3]. Оно показало, что в том диапазоне, где расчет и измерения перекрываются, расчетное положение изображения отличается от экспериментального не более чем на 50 %.

Простейшая иммерсионная скрещенная линза, осуществляющая фокусировку пучка заряженных частиц в двух перпендикулярных направлениях, может быть составлена из трех электродов. Имеются два варианта расположения этих электродов: отверстие каждого электрода повернуто на  $90^\circ$  относительно предыдущего или какие-либо два расположенные рядом электрода имеют одинаково ориентированные отверстия. Схематически такие линзы показаны на рис. 5. В первом варианте (рис. 5, а) электроды последовательно повернуты на  $90^\circ$  относительно друг друга. Для того, чтобы обеспечить фокусировку во всех направлениях, собирающие (или рассеивающие) плоскости двух частей линз также должны быть повернуты на  $90^\circ$ . Это условие выполняется только при монотонном ходе потенциала, т. е. фокусировка будет происходить в обоих направлениях как при последовательном повышении потенциалов на электродах, так и при последовательном понижении. Во втором варианте для фокусировки в обоих направлениях первые два электрода по ходу пучка должны быть одинаково ориентированы в случае последовательного замедления. В случае последовательного ускорения одинаковую ориентацию должны иметь два последних электрода (рис. 5, б). Пространственная фокусировка в такой системе может происходить и при немонотонном ходе потенциалов на электродах.

Наиболее интересными являются стигматичные режимы, когда создается точечное изображение точечного источника. В работе были исследованы трехэлектродные линзы (рис. 5) в стигматичных режимах работы. В ходе эксперимента расстояния от источника до линзы и от линзы до изображения оставались неизменными. Размеры отверстий в электродах и расстояния между электродами также не менялись. При заданной энергии пучка подбирались потенциалы на втором и третьем электродах таким образом, чтобы пучок фокусировался на

экране в точку. Затем для полученных стигматичных режимов определялись фокусные расстояния, увеличения и положения главных плоскостей.

Поскольку определение увеличений по размерам пятна на экране не обеспечивает достаточной точности, то была разработана следующая экспериментальная методика. При неизменных потенциалах на первом и последнем электродах варьировался потенциал промежуточного электрода. При этом пучок становился астигматичным и образующиеся линейные изображения располагались по обе стороны от экрана. По теневой картине на экране, измеряя размеры ячеек экранной и катодной сеток, можно точно определить увеличения линейных изображений в горизонтальном и вертикальном направлениях. В принципе, линейные увеличения в стигматичном режиме можно получить путем интерполяции, построив графики зависимостей  $M_x$  и  $M_y$  от потенциала промежуточного электрода. Однако в данном случае такой способ не обеспечивает достаточной точности, так как вблизи стигматичного режима линейные увеличения обращаются в бес-

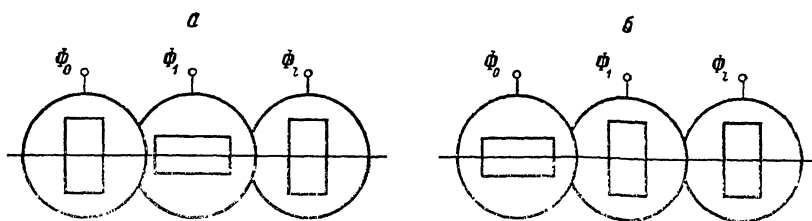


Рис. 5. Схема трехэлектродных иммерсионных линз.

конечность. Поэтому нами была найдена зависимость фокусных расстояний  $f_x$  и  $f_y$  от потенциала промежуточного электрода, так как они в окрестности стигматичного режима имеют конечную величину. Путем интерполяции были определены значения фокусных расстояний в стигматичном режиме. Это дало возможность определить линейные увеличения в двух направлениях по следующей формуле:

$$M^2 f_0 \sqrt{\Phi_i / \Phi_0} + M [f_0 (1 + \sqrt{\Phi_i / \Phi_0}) - (P + Q)] + f_0 = 0. \quad (4)$$

В качестве примера приведем параметры трехэлектродных скрещенных линз, полученные в ускорятельных режимах при расстоянии от источника до последнего электрода линзы, равном  $l_1/2b=6.33$ , и от этого электрода до экрана  $l_2/2b=20.83$ . В случае линзы, показанной на рис. 5, а, стигматичный режим, обеспечивающий фокусировку на экране, был получен при следующих значениях потенциалов:  $\Phi_0=1$  кВ,  $\Phi_1=2.14$  кВ,  $\Phi_2=4.35$  кВ. При этом  $f_{0x}/2b=3.57$  и  $M_x=1.9$ , а  $f_{0y}/2b=3.90$  и  $M_y=1.6$ . Для линзы, показанной на рис. 5, б, в стигматичном режиме получены следующие значения потенциалов:  $\Phi_0=1.00$  кВ,  $\Phi_1=1.40$  кВ,  $\Phi_2=4.78$  кВ. При этом  $f_{0x}/2b=3.54$  и  $M_x=1.8$ , а  $f_{0y}/2b=3.75$  и  $M_y=1.5$ .

Как следует из приведенных данных, различие в увеличениях  $M_x$  и  $M_y$  стигматичной иммерсионной линзы невелико, оно существенно меньше, чем в дублете, составленном из одиночных скрещенных линз или квадруполей. По сравнению с иммерсионными осесимметричными линзами иммерсионные скрещенные обладают большей оптической силой и возможностью коррекции аберраций.

#### Список литературы

- [1] Баранова Л. А., Явор С. Я. Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1986. 190 с.
- [2] Кельман В. М., Явор С. Я. Электронная оптика. 3-е изд. перераб. и доп. Л.: Наука, 1968. 487 с.
- [3] Грицюк Н. П., Лачавилил Р. А. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2467—2468.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
21 декабря 1988 г.