

УДК 537.534.3

Расчет вертикальной фокусировки ионно-оптической схемы масс-спектрометра / Л.А. Баранова, Р.А. Бубляев, С.Я. Явор // Научное приборостроение. — 1991. — Т. 1. — № 2. — С. 37-43.

Предлагается использовать дублет скрещенных линз для осуществления вертикальной фокусировки ионного пучка в масс-спектрометре. Применение дублета позволяет повысить чувствительность масс-спектрометра при сохранении разрешающей способности. Разработана методика расчета параметров дублета, которая иллюстрируется на примере масс-спектрометра МХ1321А. Библ. — 1 назв. Ил. — 3.

УДК 537.534.3

Л.А. Баранова, Р.А. Бубляев, С.Я. Явор  
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград)

### РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

В настоящей работе обсуждается проблема повышения чувствительности масс-спектрометров с двойной фокусировкой за счет введения в их схему дополнительных элементов, производящих вертикальную фокусировку пучка. Ионно-оптическая схема такого масс-спектрометра показана на рис. 1. Указанные на рис. 1 размеры относятся к варианту промышленно выпускаемого масс-спектрометра МХ1321А. В отсутствие вертикальной фокусировки происходят значительные потери заряженных частиц вследствие угловой расходимости пучка, которая приводит к тому, что в пространстве между источником и секторным магнитом поперечный размер пучка значительно увеличивается и превосходит поперечный размер камеры магнита.

Задача состоит в том, чтобы ввести вертикальную фокусировку пучка, не нарушая условий его прохождения в горизонтальной плоскости. Решение задачи возможно при использовании системы астигматических линз. Из известных типов астигматических линз наиболее подходящими являются квадрупольные и скрещенные.

Преимуществом квадрупольных линз является их большая оптическая сила. Скрещенные линзы несколько слабее, т.е. требуют приложения на электроды больших напряжений при той же энергии пучка. Однако достоинством их является простота конструкции, большая точность юстировки и меньший уровень aberrаций.

Качественно оптику скрещенной линзы можно представить как суммарное действие осесимметричной линзы, квадруполь (вклад квадрупольной составляющей, как правило, больше осесимметричной и определяется в основном отношением сторон прямоугольного отверстия) и октуполя, поэтому в общем случае она астигматична. Собрать заряженные частицы во всех направлениях можно с помощью системы из нескольких линз, собирающих и рассеивающих плоскости которых чередуются. Была рассмотрена система из двух скрещенных линз (рис. 2), которая помещалась в пространство между энергетической щелью и магнитом.

При расчете фокусировки дублета учитывалось, что на него падает астигматичный пучок, в горизонтальной плоскости проекции траектории исходят из энергетической щели, а в вертикальной — из ионного источника. Для того, чтобы не нарушать фокусировку в горизонтальной плоскости, дублет следует настроить таким образом, чтобы обратные продолжения траекторий, выходящих из дублета, пересекались по-прежнему в энергетической щели. Схематический ход траекторий в горизонтальной и вертикальной плоскостях показан на рис. 3.

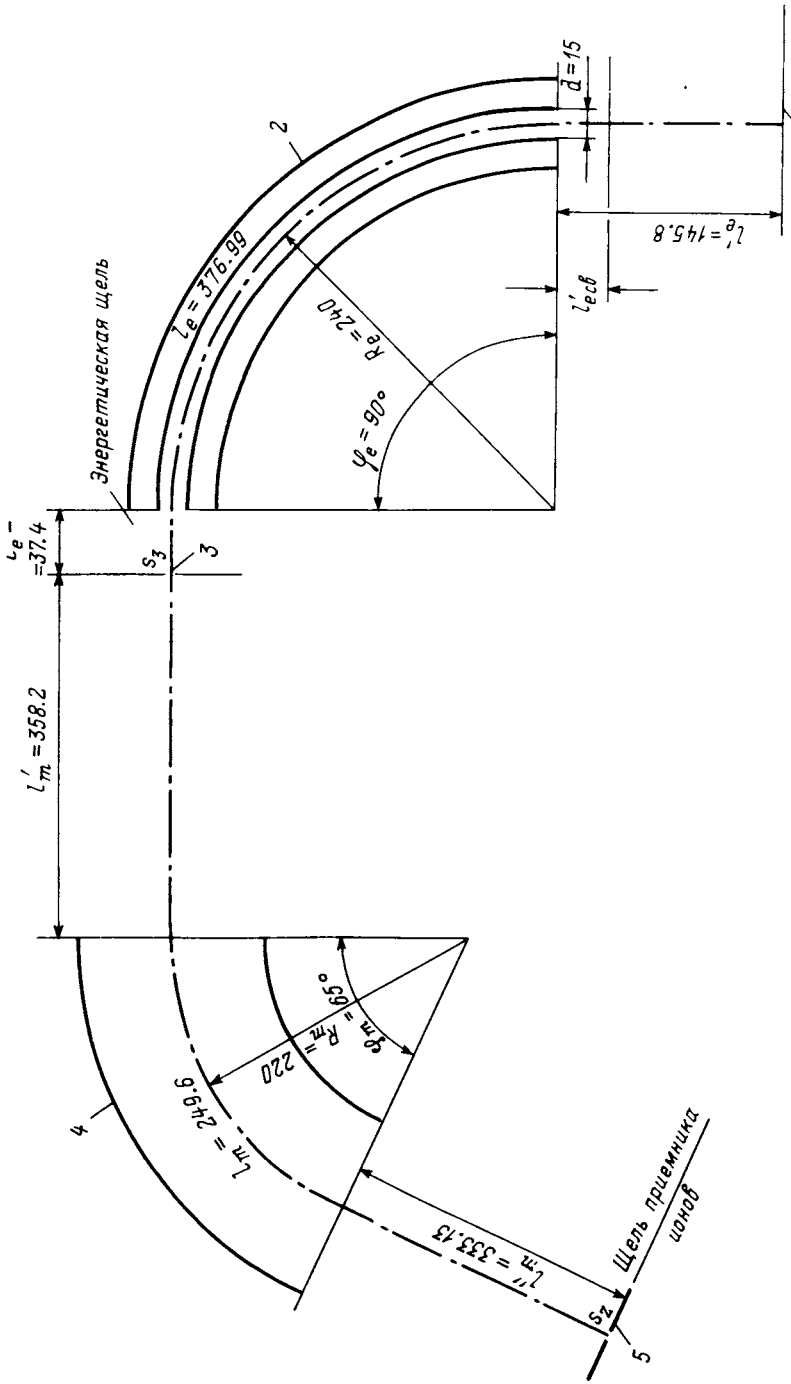


Рис. 1. Ионно-оптическая схема масс-спектрометра с двойной фокусировкой:  
 1 — источник ионов; 2 — цилиндрический электростатический конденсатор; 3 — энергетическая щель; 4 — секторный магнит с однородным полем; 5 — приемник ионов

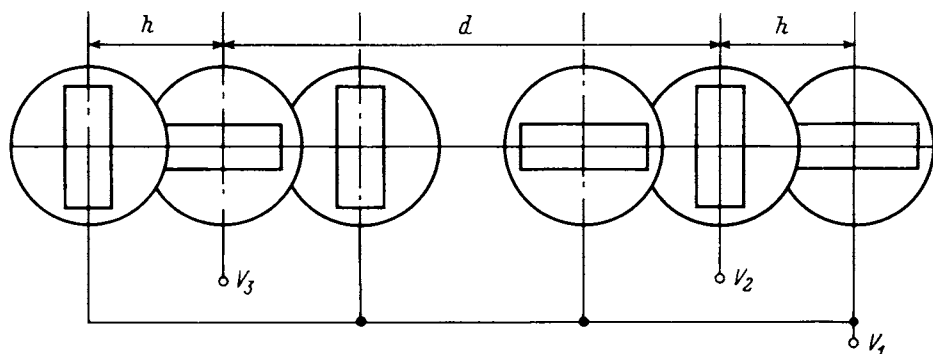


Рис. 2. Дублет скрещенных линз

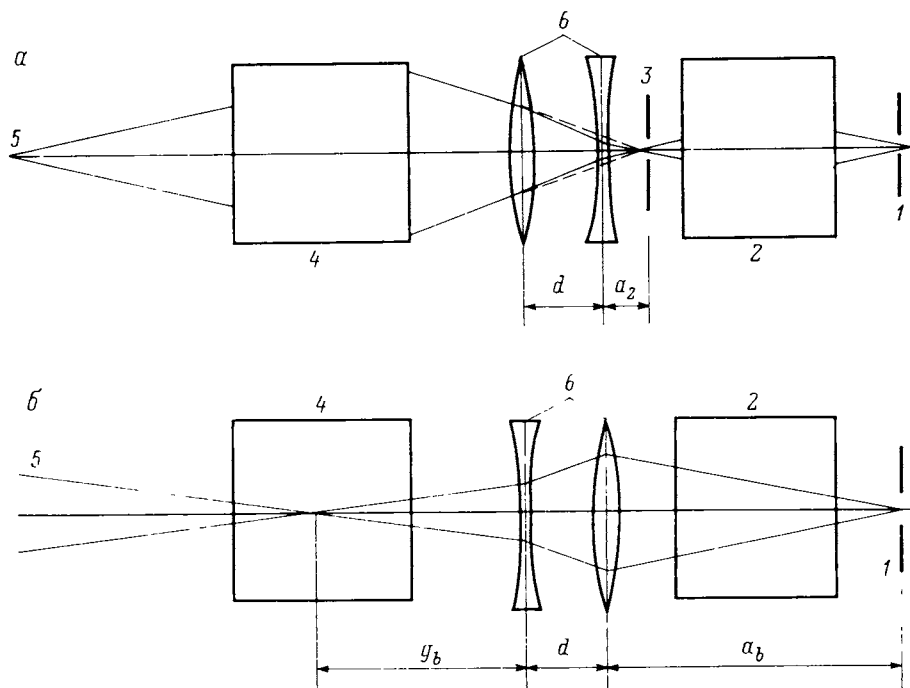


Рис. 3. Схематический ход траекторий в дублете скрещенных линз в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Если рассматривать линзы дублета как тонкие, то условие неизменности фокусировки в горизонтальной плоскости (промежуточная фокусировка происходит в плоскости энергетической щели) запишется следующим образом:

$$f_2 = \frac{a_2 + d}{a_2} \left[ \frac{a_2 + d}{a_2} f_1 - d \right]. \quad (1)$$

Это выражение дает связь между фокусными расстояниями первой  $f_1$  и второй  $f_2$  линз дублета. Здесь  $a_2$  — расстояние от энергетической щели до центра первой линзы;  $d$  — расстояние между центрами линз. В этой плоскости первая линза рассеивает заряженные частицы, а вторая — собирает. В вертикальной плоскости первая линза собирает заряженные частицы, что обеспечивает лучшее токопрохождение и требует меньших потенциалов на линзах. Задавая положение изображения в вертикальной плоскости  $g_b$ , получим второе условие, связывающее фокусные расстояния линз:

$$g_b = \frac{f_2 a_B d + f_1 f_2 a_B + f_1 f_2 d}{a_B d + f_1 a_B - f_1 d - f_2 a_B - f_1 f_2}. \quad (2)$$

Здесь  $a_B$  — расстояние от щели ионного источника до центра первой линзы.

Уравнения (1) и (2) позволяют однозначно определить  $f_1$  и  $f_2$ . Совместное решение (1) и (2) дает по два значения для  $f_1$  и  $f_2$ , при этом положительные значения фокусных расстояний соответствуют схеме, в которой первая линза в горизонтальной плоскости собирает заряженные частицы. Отрицательные значения  $f_1$  и  $f_2$  соответствуют собирающей первой линзе в вертикальной плоскости. Как указывалось выше, последний вариант оказался предпочтительнее.

Анализ расчета ряда вариантов показал, что максимальное токопрохождение достигается в том случае, когда дублет расположен вплотную к энергетической щели. Предельным случаем является совмещение первой линзы, которая считается тонкой, с энергетической щелью, при этом оптическая сила второй линзы обращается в нуль. Однако практически такой вариант неосуществим, так как линза не является тонкой, она искажает ход траекторий вблизи энергетической щели и ухудшает разрешение прибора.

Разработанная методика была применена для расчета дублета скрещенных линз, включенного в ионно-оптическую схему масс-спектрометра МХ1321А. Из высказанных ранее соображений дублет помещался по возможности близко к энергетической щели со стороны секторного магнита. Были выбраны следующие установочные размеры: расстояние между центрами линз  $d = 45$  мм, расстояние между электродами линз  $h = 7.5$  мм, расстояние от энергетической щели до первого электрода 2.5 мм.

Положение изображения, создаваемого дублетом в вертикальной плоскости, определяется из условия максимального

токопрохождения. Если задаться вертикальным размером щели приемника 10 мм и учесть, что зазор камеры магнита составляет 5 мм, то оптимальной является такая настройка дублета, при которой траектория, имеющая поперечное смещение 2.5 мм на входе в магнит, имеет в плоскости приемника смещение 5 мм (см. рис. 3, б). Тогда расстояние от центра второй линзы до положения изображения в вертикальной плоскости составит  $g_b = 497.3$  мм.

На основании уравнений (1) и (2) были рассчитаны фокусные расстояния скрещенных линз, составляющих дублет. Их абсолютные величины равны  $f_1 = 274$  мм,  $f_2 = 8520$  мм.

Как видим, благодаря близкому расположению дублета к энергетической щели, основную роль в фокусировке пучка играет первая линза. Оптическая сила второй линзы мала, она осуществляет некоторое корректирующее действие.

Рассчитаем в плоскости входа в магнит поперечный размер пучка, выходящего из точки на оси источника, поскольку анализ хода траекторий показал, что именно в этой плоскости происходит зарезание пучка (см. рис. 3, б). Если половина угла раствора пучка при выходе из источника составляет в вертикальной плоскости  $1^\circ$ , то поперечный размер пучка в указанной плоскости составит 7.2 мм. Поскольку зазор камеры магнита равен 5 мм, через магнит пройдет только часть пучка, составляющая примерно 0.7 от первоначальной интенсивности. В отсутствие дублета вырезание пучка происходит в плоскости выхода из магнита, где поперечный размер пучка равен 40 мм, и из него вырезается 0.125 часть от полной интенсивности. Таким образом, дублет обеспечивает выигрыш в токопрохождении примерно в 5.5 раза.

Приведенные выше рассуждения справедливы для точки источника, расположенной на оси. Поскольку в действительности щель ионного источника имеет длину 4 мм, необходимо учесть линейное увеличение изображения, создаваемое дублетом. В нашем случае в приближении тонких линз оно равно 0.97, т.е. размер изображения источника не превышает 4 мм (изображение расположено внутри магнита).

Расчеты показали, что траектория, выходящая параллельно оси из края щели, в рассматриваемом случае проходит на расстоянии 2.4 мм от оси. В плоскости детектора она отстоит от оси на 4.8 мм.

На основании приведенных данных были выбраны геометрические размеры и потенциалы линз дублета. Каждый электрод линз имеет форму круглого диска диаметром 45–50 мм с прямоугольным отверстием, центр которого совпадает с центром диска. Размеры прямоугольного отверстия равны:  $2a = 30$  мм,  $2b = 15$  мм. Отверстия в соседних электродах повернуты друг относительно друга на  $90^\circ$ . Расстояние между центральными электродами линз дублета равно 45 мм.

Разности потенциалов между электродами линз дублета (для определенных выше фокусных расстояний) можно найти из номограмм [см. литературу]. Для энергии пучка 6.4 кВ разность

потенциалов между электродами первой линзы равна  $V_1 - V_2 = +400$  В или  $V_1 - V_2 = -430$  В. Разность потенциалов между электродами второй линзы мала и составляет примерно  $V_3 - V_1 = \pm 15$  В (знаки  $V_1$  и  $V_3$  совпадают). Отсюда видно, что на центральные электроды линз можно подавать потенциалы как выше потенциала крайних электродов, так и ниже его. Ускоряющий потенциал на центральном электроде обеспечивает несколько меньший уровень aberrаций, при замедляющем потенциале линза несколько сильнее.

Следует иметь в виду, что ориентация отверстий в скрещенных линзах зависит от знака разности потенциалов на ее электродах. Для того, чтобы первая линза дублета обладала собирающим действием в вертикальной плоскости при ускоряющем потенциале на ее центральном электроде ( $V_2 - V_1 < 0$ ), отверстие этого электрода должно быть вытянуто в вертикальном направлении. При замедляющем потенциале ( $V_2 - V_1 > 0$ ) на центральном электроде его отверстие должно быть вытянуто в горизонтальном направлении. Следовательно, ориентация линз дублета, указанная на рис. 2 (пучок летит справа налево), соответствует ускоряющим потенциалам на центральных электродах.

Рассчитанная система линз позволяет пропустить 0.7 интенсивности пучка, исходящего из точки на оси с углом раствора  $\pm 1^\circ$ . Как показало подробное исследование, любая система линз, расположенная между электростатическим анализатором и магнитом, при указанной выше (см. рис. 1) геометрии этих элементов не дает возможности превысить эту величину. Увеличить пропускание такого пучка можно, поместив еще один дублет скрещенных линз между ионным источником и электростатическим анализатором. Дублет может быть настроен таким образом, чтобы, не меняя фокусировку пучка в горизонтальной плоскости, в вертикальной обеспечить полное пропускание пучка, исходящего из точки на оси. Однако анализ расчета ряда вариантов показал, что линейное увеличение всей системы линз в вертикальной плоскости при этом становится больше единицы. Вследствие этого частицы, испускаемые с крайних точек ионного источника, не проходят через межполюсную зазор магнита. Таким образом, установка второго дублета в конечном счете не позволит добиться увеличения интенсивности пропускаемого пучка масс-спектрометра MX1321A.

Аберрации, вносимые дублетом скрещенных линз, имеют третий порядок малости, тогда как аберрации цилиндрического конденсатора и секторного магнита имеют второй порядок малости и значительно превышают аберрации линз. Таким образом, аберрации, вносимые дублетом, не ухудшают качество фокусировки масс-спектрометра.

---

ЛИТЕРАТУРА

Баранова Л.А., Бубляев Р.А., Явор С.Я. Приближенный метод расчета параксиальной оптики скрещенных линз // ЖТФ. — 1987. — Т. 57. — № 3. — С. 430-432.

Рукопись поступила 03.12.90