Журнал технической физики, 1997, том 67, № 1

10

Отклоняющие системы с фокусировкой по энергии

© Л.А. Баранова, С.Я. Явор

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 13 декабря 1995 г.)

При отклонении пучков заряженных частиц сравнительно небольшой энергии используются электростатические отклоняющие системы, например плоские конденсаторы. При этом, если частицы в пучке обладают большим разбросом по энергии, происходит значительное расширение пучка после прохождения им дефлектора. В данной работе предлагается ахроматическая электростатическая отклоняющая система, т. е. система, обладающая фокусировкой по энергии.

Принципиальная особенность такой системы заключается в том, что она состоит из двух дефлекторов, между которыми располагается элемент, изменяющий энергию частиц (см. рисунок). Следует отметить, что промежуточное ускорение было использовано в магнитном спектрометре с фокусировкой по энергии [1].

Проведем расчет такой системы на примере двух плоских конденсаторов с напряженностью поля в первом E_1 и эффективной длиной $2l_1$, напряженностью поля во втором E_2 и эффективной длиной $2l_2$. Будем считать, что отклонения в конденсаторах малы и производятся в противоположных направлениях. При этом центры отклонения находятся в середине конденсаторов, а углы отклонения осевой траектории по абсолютной величине равны

$$\vartheta_1 = \frac{eE_1 l_1}{U} = \frac{K_1}{U}, \quad \vartheta_2 = \frac{eE_2 l_2}{U+U_0} = \frac{K_2}{U+U_0}, \qquad (1)$$

где U — потенциал, соответствующий начальной энергии заряженной частицы; U_0 — его изменение.

Обозначим расстояние между конденсаторами через S_1, а расстояние от конца второго конденсатора до плоскости детектора через S_2. Тогда расстояние h частицы, идущей по осевой траектории, от оси x в плоскости детектора будет равно

$$h = \vartheta_1(L_1+L_2) - \vartheta_2 L_2, \qquad (2)$$

где

$$L_1 = l_1 + S_1 + l_2, \quad L_2 = l_2 + S_2. \qquad (3)$$

Условие независимости величины h от малых изменений начальной энергии частиц имеет вид

$$\frac{\partial h}{\partial U} = \frac{\partial \vartheta_1}{\partial U}(L_1+L_2) - \frac{\partial \vartheta_2}{\partial U} L_2 = 0. \qquad (4)$$

Учитывая выражения (1) и проведя дифференцирование, получим

$$\frac{K_1(L_1+L_2)}{U^2} = \frac{K_2 L_2}{(U+U_0)^2}. \qquad (5)$$

Решение квадратного уравнения дает для U_0 два значения

$$U_0 = U\left[\pm\sqrt{\frac{K_2L_2}{K_1(L_1+L_2)}} - 1\right]. \qquad (6)$$

Знак "минус" перед корнем соответствует замедляющему потенциалу, который по абсолютной величине превышает потенциал U, определяющий начальную энергию пучка заряженных частиц. Этот случай, соответствующий отражению пучка, следует отбросить, поэтому мы ограничим наше рассмотрение знаком "плюс" перед корнем. Тогда потенциал пространства после изменения энергии равен

$$U + U_0 = U\sqrt{\frac{K_2L_2}{K_1(L_1+L_2)}}. \qquad (7)$$

В зависимости от величины подкоренного выражения потенциал будет положительным или отрицательным. При $K_2L_2 > K_1(L_1+L_2)$, т. е. когда второй конденсатор значительно сильнее первого, потенциал U_0 положителен. Следовательно, для получения ахроматического отклонения пучок заряженных частиц между конденсаторами должен быть ускорен. При $K_2L_2 < K_1(L_1+L_2)$ ахроматизм достигается путем замедления.

С учетом выражения (7) величина h, определяемая формулой (2), примет вид

$$h = \frac{1}{U}\left[K_1(L_1+L_2) - \sqrt{K_1K_2(L_1+L_2)L_2}\right]. \qquad (8)$$

Увеличивая потенциал U_0 по абсолютной величине, можно добиться изменения знака хроматической аберрации.

Система из двух конденсаторов часто применяется в тех случаях, когда необходимо осуществить параллельный сдвиг пучка без изменения его направления. При этом углы отклонения в обоих конденсаторах должны быть равны по величине. Тогда из выражений (1) и (7) получим условие ахроматического параллельного сдвига

$$K_2 = K_1\frac{L_2}{L_1+L_2}. \qquad (9)$$

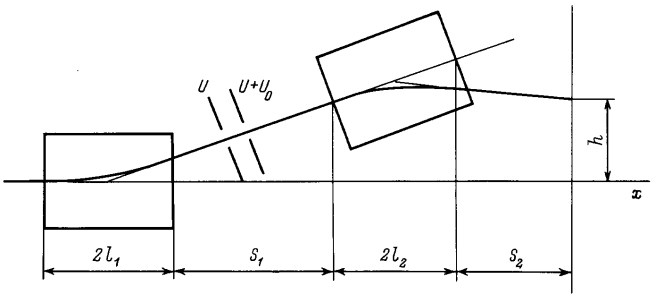

Схема отклоняющей системы и осевой траектории пучка.

Выражения (7) и (8) преобразуются к виду

$$U + U_0 = U\frac{L_2}{L_1 + L_2}, \qquad (10)$$

$$h = \frac{K_1 L_1}{U}. \qquad (11)$$

Из (10) следует, что при параллельном сдвиге пучка ахроматизация возможна только в результате промежуточного замедления пучка.

Рассмотрим случай, когда нам задана система из двух конденсаторов и необходимо провести ахроматизацию отклонения, не изменяя хода осевой траектории. Поскольку для осуществления ахроматизации требуется изменить энергию пучка в промежутке между двумя конденсаторами, то для сохранения хода осевой траектории нужно соответствующим образом изменить напряженность поля во втором конденсаторе. Условие неизменности хода осевой траектории, очевидно, можно записать следующим образом:

$$\vartheta_{2p} = \vartheta_{2a}, \qquad (12)$$

где ϑ_{2p} — первоначальный угол отклонения во втором конденсаторе, ϑ_{2a} — угол отклонения после проведения ахроматизации.

Используя выражения (1) и (7), получим из (12) значение K_{2a} после ахроматизации

$$K_{2a} = \frac{K_{2p}^2 L_2}{K_1(L_1 + L_2)}. \qquad (13)$$

Подставляя новое значение K_{2a} в (7), нетрудно найти величину изменения энергии. В некоторых случаях требуется ахроматизация не положения пучка в плоскости детектора, а угла выхода пучка из системы $\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$. Соответственно условие независимости ϑ от начальной энергии пучка имеет вид

$$\frac{\partial\vartheta_1}{\partial U} - \frac{\partial\vartheta_2}{\partial U} = 0. \qquad (14)$$

Потенциал пространства после изменения энергии в этом случае равен

$$U + U_0 = U\sqrt{\frac{K_2}{K_1}}. \qquad (15)$$

Аналогичный расчет можно провести для малого отклонения в магнитных отклоняющих системах. Рассмотрим прохождение пучка заряженных частиц последовательно через два магнита с однородными и противоположно направленными полями H_1 и H_2. Будем полагать, что осевая траектория проходит перпендикулярно границам магнитов. Схема системы в этих предположениях совпадает с представленной на рисунке. Положение осевой траектории в плоскости детектора по-прежнему описывается выражением (2), если сохранить те же обозначения для геометрических параметров. Углы отклонения ϑ_1 и ϑ_2 в этом случае запишутся следующим образом:

$$\vartheta_1 = 2H_1 l_1\sqrt{\frac{e}{2mU}} = \frac{P_1}{U},$$
$$\vartheta_2 = 2H_2 l_2\sqrt{\frac{e}{2m(U+U_0)}} = \frac{P_2}{\sqrt{U+U_0}}. \qquad (16)$$

Условие независимости величины h от малых изменений энергии найдем из выражения (4), оно имеет вид

$$\frac{P_1(L_1 + L_2)}{\sqrt{U^3}} = \frac{P_2 L_2}{\sqrt{(U+U_0)^3}}. \qquad (17)$$

После алгебраических преобразований получим для потенциала пространства в области второго магнита

$$U + U_0 = U\left[\frac{P_2 L_2}{P_1(L_1 + L_2)}\right]^{2/3}. \qquad (18)$$

В этом случае ахроматизация также возможна как при промежуточном ускорении пучка, так и при его замедлении.

Если требуется ахроматизация не положения пятна в плоскости детектора, а угла выхода, то потенциал $U + U_0$ примет вид

$$U + U_0 = U\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/3}. \qquad (19)$$

Таким образом, в работе получены условия ахроматического отклонения пучка заряженных частиц в системе из двух отклоняющих элементов путем изменения энергии пучка между этими элементами. Приведены необходимые для расчета системы формулы в приближении малых углов отклонения. Полученные по этим формулам данные могут служить первым приближением для точного расчета систем с большим отклонением с использованием имеющихся в настоящее время программ для численного расчета произвольных электронно-оптических систем.

Список литературы

[1] *Wollnik H.* Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1995. Vol. A363. P. 393–396.