

## Численное моделирование ахроматических отклоняющих систем

© Л.А. Баранова, С.Я. Явор

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

(Поступило в Редакцию 5 декабря 1996 г.)

Проведен численный расчет отклоняющей системы, образованной двумя плоскими конденсаторами, между которыми расположен электронно-оптический элемент, изменяющий энергию пучка заряженных частиц. Найдены условия коррекции хроматического размытия пучка в плоскости мишени. Показано хорошее согласие с результатами приближенного аналитического расчета.

Отклонение и фокусировка пучков заряженных частиц, энергии которых заключены в некотором энергетическом интервале, приводит к размытию пучков в плоскости регистрации и ухудшению разрешения. Как показано в ряде работ [1–4], изменение энергии пучка внутри системы, осуществляемое между отклоняющими или фокусирующими элементами, дает возможность скорректировать хроматическое размытие пучка. В линзовых системах изменение энергии должно происходить в промежутке между рассеивающей и собирающей линзами, а в отклоняющих системах — между двумя дефлекторами, отклоняющими пучок в противоположных направлениях.

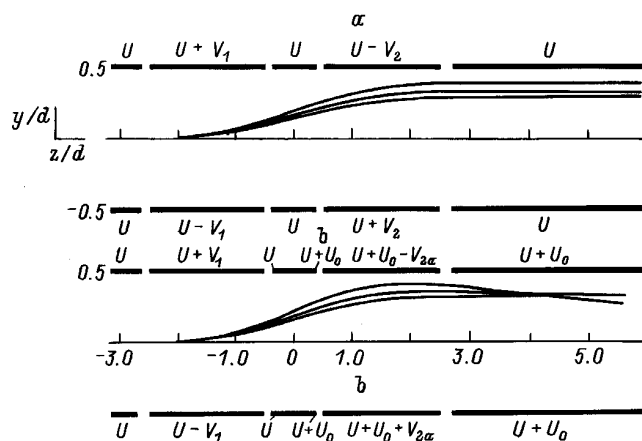
Проведенный нами приближенный аналитический расчет показал, что в обоих случаях коррекция хроматического размытия возможна как при промежуточном ускорении, так и при замедлении пучка заряженных частиц. Однако при численном моделировании линзовых систем удалось добиться ахроматизации только в ускоряющем режиме [1,2].

В настоящей работе проведено численное исследование ахроматических отклоняющих систем с целью проверки выводов приближенного аналитического расчета. В качестве примера выбрана система, образованная двумя отклоняющими элементами, расположенными соосно, между которыми находится электронно-оптический элемент, изменяющий энергию пучка заряженных частиц. Исследование проводилось на основании программы расчета распределения поля и траекторий в электронно-оптических системах СРОЗД [5]. Сечение системы электродов, используемой при численном расчете, плоскостью  $yz$  показано на рис. 1. Вся система образована набором плоских электродов, вытянутых вдоль оси  $x$ . В центре ее находится элемент, предназначенный для изменения энергии пучка. По обеим сторонам этого элемента расположены два плоских конденсатора, отклоняющих пучок в противоположных направлениях. Слева и справа система замкнута двумя прямоугольными коробками (на рис. 1 крышка левой коробки не указана), что необходимо для корректной работы программы СРОЗД. Коробки находятся под постоянными потенциалами и мало влияют на оптические свойства системы. За единицу длины выбрано расстояние  $d$  между противоположащими пластинами. Дли-

на отклоняющих пластин в направлении  $z$  составляет  $2l_1 = 2l_2 = 2.0$ . Длина промежуточного элемента равна 0.8. Длина замыкающих коробок в направлении  $z$  составляет 3.4. Ширина зазоров между соседними пластинами, лежащими в одной плоскости, равна 0.1. Отметим, что на рис. 1 масштаб в направлениях осей  $y$  и  $z$  различен.

На рис. 1, *a* представлена нескорректированная система. Электроды, замыкающие систему слева и справа, а также промежуточный элемент находятся под одним и тем же потенциалом  $U$ . На первую пару отклоняющих пластин поданы потенциалы  $U \pm V_1$  и  $U \mp V_2$ . На этом же рисунке показан ход трех траекторий с энергией частиц, равной  $E = 0.85eU$ ,  $1.0eU$  и  $15eU$ . Отклоняющие потенциалы, приложенные к пластинам обоих конденсаторов, равны по абсолютной величине и составляют  $V_1 = V_2 = 0.05U$ . Можно видеть, что в этом случае на выходе из системы траектории практически параллельны друг другу и оси  $z$ . Хроматическое размытие пучка довольно велико и составляет 28% от расстояния между осевой траекторией и осью  $z$  при разбросе энергии в 30%.

На рис. 1, *b* показаны траектории частиц с той же энергией в той же электродной системе после проведения ахроматизации. Для этого на электроды промежуточно-



**Рис. 1.** Схема системы электродов, используемой при численном расчете, и траектории частиц с энергией  $E = 0.85eU$ ,  $1.0eU$ ,  $1.15eU$ . *a* — нескорректированная система, *b* — система со скорректированным хроматическим покрытием.

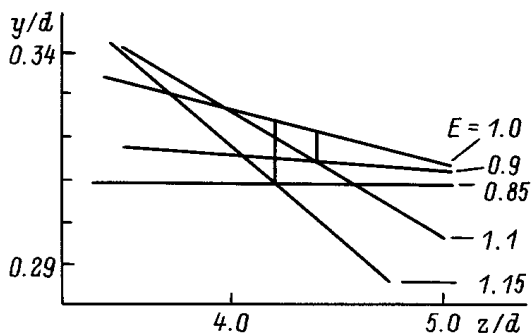


Рис. 2. Структура кроссовера пучка в системе со скорректированным хроматическим размытием. Энергии частиц указаны на рисунке в единицах  $eU$ .

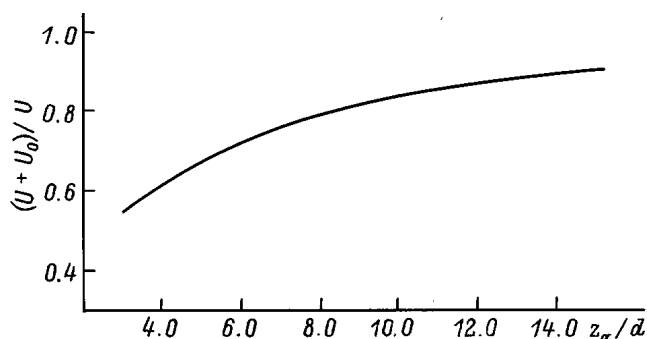


Рис. 3. Изменение замедляющего потенциала в зависимости от положения плоскости ахроматизации.

го элемента подан потенциал, линейно распределенный вдоль оси  $z$  и меняющийся от значения  $U$  до значения  $U + U_0$ . Потенциал пространства за этим элементом принимает значение  $U + U_0$ , а ко второму конденсатору приложено отклоняющее напряжение, равное

$$V_{2a} = V_2(U + U_0)/U. \quad (1)$$

В примере, приведенном на рис. 1,  $b$ ,  $U + U_0 = 0.62U$  и  $V_{2a} = 0.62V_2$ , т.е. заряженные частицы замедляются между двумя дефлекторами. Из рис. 1,  $b$  видно, что теперь траектории с разной энергией пересекают друг друга, причем наименьшее сечение пучок имеет в плоскости  $z_a = 4.2$ . Минимальное хроматическое размытие теперь составляет 4.5% от расстояния между осевой траекторией пучка и осью  $z$ .

На рис. 2 в увеличенном масштабе показана структура скорректированного пучка вблизи плоскости наименьшего сечения. Дополнительно показаны траектории частиц с энергиями  $0.9eU$  и  $1.1eU$ . При таком уменьшенном энергетическом разбросе кроссовер располагается в плоскости  $z_a = 4.4$ . Таким образом, с уменьшением энергетического разброса в пучке кроссовер удаляется от системы.

Была исследована зависимость условий ахроматичности от различных параметров. На рис. 3 показана связь

между положением плоскости коррекции  $z_a$  и потенциалом пространства за отклоняющей системой после замедления при разбросе энергии  $+0.15eU$ . Видно, что плоскость коррекции удаляется от системы с уменьшением абсолютной величины замедляющего потенциала  $U_0$ . При расчете потенциал  $V_1$  оставался неизменным и равным  $0.05U$ , а потенциал  $V_2$  был равен  $0.05U$  в отсутствие замедления и далее менялся пропорционально  $(U + U_0)/U$ . В этом случае осевая траектория пучка меняется мало.

При неизменном замедлении положение плоскости коррекции можно варьировать, меняя отношение потенциалов  $V_{2a}/V_1$ , однако в этом случае угол наклона осевой траектории не остается неизменным. С ростом отношения  $V_{2a}/V_1$  плоскость коррекции приближается к отклоняющей системе, а осевая траектория наклоняется к оси  $z$  и, следовательно, расстояние от кроссовера до оси  $z$  уменьшается.

Описанная ахроматическая отклоняющая система может быть рекомендована к использованию в качестве сканирующей. При сканировании мишени пучком заряженных частиц желательно, чтобы пучок оставался перпендикулярным плоскости мишени. В отсутствие замедления рассмотренная система обеспечивает нормальное падение пучка на мишень при  $V_2 = V_1$ . Следовательно, в ахроматической системе отклоняющие потенциалы при сканировании должны быть связаны следующим образом (см. (1)):

$$V_{2a} = V_1(U + U_0)/U. \quad (2)$$

Расчеты показали, что при заданном положении мишени величина корректирующего потенциала  $U_0$  в процессе сканирования практически не меняется, следовательно, отношение потенциалов  $V_{2a}/V_1$  также остается неизменным.

Коррекция хроматического размытия в отклоняющей системе возможна также при ускорении пучка заряженных частиц между двумя дефлекторами, однако в этом случае нельзя добиться нормального падения скорректированного пучка на мишень. Условия ахроматичности выполняются в том случае, когда осевая траектория на выходе наклонена к оси  $z$ , причем плоскость коррекции располагается дальше от системы, чем точка пересечения пучка с осью  $z$ .

Сравнение полученных результатов с результатами приближенного расчета, приведенными в [4], показывает, что качественно они хорошо согласуются и приводят к одним и тем же заключениям. Количественно согласие можно проиллюстрировать на одном из примеров, приведенных выше. Для случая, показанного на рис. 1,  $b$ , приближенный расчет дает значение  $U + U_0 = 0.5U$ , что на 20% отличается от результата численного расчета. При уменьшении энергетического разброса в пучке согласие приближенного и численного расчетов улучшается.

## Список литературы

- [1] Баранова Л.А., Ульянова Н.С., Явор С.Я. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 7. С. 157.
- [2] Baranova L.A., Yavor S.Ya., Read F.H. // Rev. Sci. Instr. 1996. Vol. 67. N 3. P. 756–760.
- [3] Baranova L.A., Yavor S.Ya. // Proc. SPIE conf. "Charged Particle Optics". Denver: Colorado, 1996.
- [4] Баранова Л.А., Явор С.Я. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 128–129.
- [5] Program CPO3D. Available from RB Consultants Ltd. Univ of Manchester. Manchester M13 9PL, UK.