

Прохождение пучков ионов через параллельные сетки

© Л.Е. Щебелина

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

(Поступило в Редакцию 27 июня 2006 г.)

Получены аналитические выражения, описывающие математическое ожидание и дисперсию времени пролета нерелятивистской заряженной частицы через многоэлектродную систему из параллельных сеток. Эти выражения могут быть использованы для оптимизации конструкции ряда устройств, в частности, систем для сеточного удержания плазмы и времяпролетных масс-спектрометров.

PACS: 41.85.Ja

Многие технические устройства содержат плоские сетчатые электроды (см., например, [1–3] и библиографию, приведенную в этих работах). У вектора электрического поля, создаваемого заряженной плоской сеткой, имеются компоненты, параллельные поверхности сетки [1]. Данные компоненты электрического поля обычно оказывают отрицательное воздействие на траектории заряженных частиц, проходящих через сетки. Так, например, они ухудшают практически достигаемые чувствительность и разрешение масс-спектрометров вследствие возмущения траекторий ионов [1]. Очевидно, что для оценки достижимых параметров и оптимизации конструкции масс-спектрометров и других устройств, содержащих сеточные электроды, необходим количественный анализ таких возмущений траекторий ионов и электронов. Ниже представлены аналитические выражения, которые могут быть использованы при проведении такого анализа.

Рассмотрим движение заряженной нерелятивистской частицы в электрическом поле, которое создается системой из N параллельных сеток, состоящих из параллельных стержней (см. рисунок). Потенциал k -й сетки равен U_k ($k = 1, 2, \dots, N$). Движение частицы начинается в плоскости с потенциалом U_0 . Продольная координата этой плоскости выбрана в качестве начала отсчета координаты y ; одна из точек этой плоскости выбрана в качестве начала отсчета координаты x (см. рисунок). Для простоты полагаем, что скорость частицы в начале координат пренебрежимо мала [1].

После прохождения k -й сетки частица приобретает полную скорость V_k , абсолютная величина которой определяется выражением

$$V_k = \sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{U_0 - U_k}, \quad (1)$$

где e и m — абсолютные значения электрического заряда и массы частицы соответственно. Абсолютное значение v_k поперечной компоненты \mathbf{V} зависит как от x , так и от y .

Как показано в [1], в реальных устройствах величина Δv_k изменения v_k вследствие прохождения частицы через k -ю сетку может быть вычислена в рамках так на-

зываемого линейного приближения, согласно которому

$$\Delta v_k \approx \frac{2\pi e q_k}{m U_k} \left(1 - \frac{x_{0k}}{a_k} \right), \quad (2)$$

где q_k — заряд стержня k -й сетки, a_k — половина ее периода и x_{0k} — параметр соударения, описывающий взаимодействие частицы с ближайшим стержнем данной сетки.

Можно показать, что после прохождения частицы через k сеток ее продольная скорость u_k определяется выражением

$$u_k \approx V_k - \frac{1}{2} \frac{v_k^2}{V_k}, \quad (3)$$

а время t_k прохождения частицы через k -й интервал между сетками определяется выражением

$$t_k \approx \frac{2d_k}{u_k + u_{k+1}} \approx \Delta t_k \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v_k^2}{V_k V_{k+1}} \right], \quad (4)$$

где

$$\Delta t_k = \frac{2d_k}{V_k + V_{k+1}} \quad (5)$$

— минимальное время прохождения частицы через k -й интервал.

Обозначим полное время прохождения частицы сквозь N сеток через t . Используя выражения (1)–(5) и формулы теории вероятностей (см., например, [4]), покажем, что математическое ожидание $M(t)$ и дисперсию $D(t)$ этого времени можно представить как

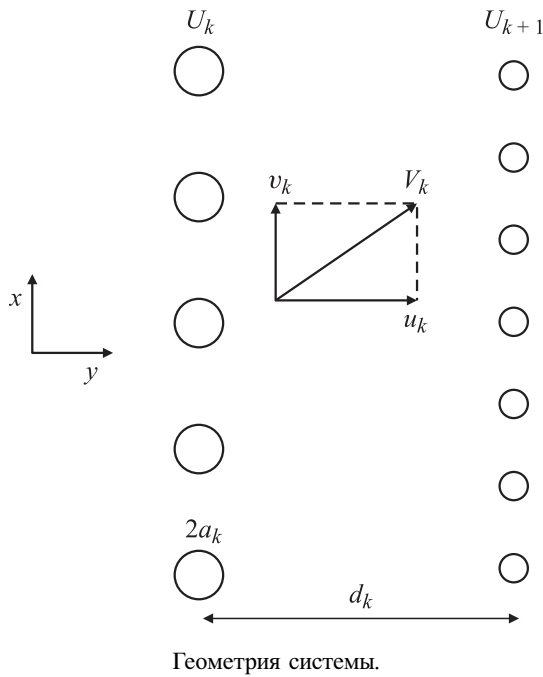
$$M(t) = T + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N T_i \tilde{V}_i^2 \quad (6)$$

и

$$D(t) = \frac{4}{45} \sum_{i=1}^N T_i^2 \tilde{V}_i^4 + \frac{4}{9} \sum_{i<j}^N T_j^2 \tilde{V}_i^2 \tilde{V}_j^2, \quad (7)$$

где $T = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$ — минимально возможное значение t ,

$T_j = \sum_{i=1}^N \Delta T_i$, $\Delta T_i = \Delta t_i \frac{v_0^2}{v_i v_{i+1}}$, $V_0 = \sqrt{2e/m} \sqrt{U_0}$ — дрей-



фовая скорость частицы,

$$\tilde{v}_i^2 = \frac{(v_i^{(\max)})^2}{2V_0^2}, \quad v_i^{(\max)} = \frac{2\pi e q_i}{mV_i} \left(1 - \frac{r_i}{a_i}\right),$$

r_i — радиус стержней i -й сетки.

Уравнение (7) дает, что корреляционный момент времени прохождения частицы сквозь i -й и j -й интервалы между сетками описывается выражением [4]:

$$K_{t_i, t_j} = \frac{2}{9} T_j^2 \tilde{v}_i^2 \tilde{v}_j^2. \quad (8)$$

Таким образом, уравнение (7) можно представить в виде

$$D(t) = \sum_{i=1}^N D(t_i) + 2 \sum_{i < j} K_{t_i, t_j},$$

где $D(t_i)$ — дисперсия t_i .

Уравнение (7) может быть использовано для определения влияния рассеяния ионов на нескольких сетках на разрешение масс-спектрометра. Пригодное для этой цели сравнительно простое аналитическое выражение выведено впервые. Это выражение и метод вычисления чувствительности, представленный в [1], позволяют оптимизировать конструкции масс-спектрометров с круглыми и квадратными детекторами частиц.

Метод, использованный при выводе уравнений (6)–(8), позволил найти математическое ожидание и дисперсию времени прохождения частицы через несколько параллельных решеток с квадратными ячейками и корреляционные моменты времен прохождения частицы через интервалы между такими сетками. Этот метод также использовался для нахождения вышеупомянутых параметров в ситуации, когда электрическое поле,

создаваемое сетками, отражает частицы (результаты будут представлены в отдельной работе).

В заключение отметим, что количественный анализ влияния электрических полей, создаваемых несколькими сетками, на движение заряженных частиц полезен для оптимизации целого ряда технических устройств. Так, по-видимому, анализ, подобный представленному выше, и результаты исследований в области полей, создаваемых цилиндрическими сетками (см., например, [5]), полезны для оптимизации термоядерных установок с удержанием плазмы электрическим полем и/или прямым преобразованием кинетической энергии альфа-частиц в электроэнергию (см., например, [6–9]). Анализ электрических полей, создаваемых несколькими плоскими или/и искривленными сетками, также необходим для оптимизации защиты зеркал коротковолновых лазеров электрическими полями [10] и разработки методик создания высококачественных пучков антипротонов или других частиц в ситуациях, описанных в работах [11–13].

Список литературы

- [1] Константинов О.В., Мамырин Б.А., Щебелина Л.Е. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 6. С. 1075–1081.
- [2] Савельев В.В., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 10. С. 939–943.
- [3] Гундиенков В.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 6. С. 589–595.
- [4] Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
- [5] Константинов О.В., Щебелина Л.Е. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 5. С. 973–975.
- [6] Гончаров Г.А. // УФН. 2001. Т. 171. С. 894–901.
- [7] Nebel R.A., Barnes D.C. // Fusion Technology. 1998. Vol. 34. P. 28–45.
- [8] Miley G.H., Hora H. // Inertial Fusion Science Applications / Ed. by V.A. Hammel et al. 2003. P. 418–421.
- [9] Nebel R.A., Strange S., Park J. et al. // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12. Paper 012701.
- [10] Shmatov M.L. // Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. № 1682. 1996.
- [11] Perkins L.J., Orth C.D., Tabak M. // Nucl. Fusion. 2004. Vol. 44. P. 1097–1117.
- [12] Shmatov M.L. // JBIS. 2005. Vol. 58. P. 74–81.
- [13] Wada M., Yamazaki Y. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2004. Vol. 214. P. 196–200.