

01;09;10

©1995

УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СКРЕЩЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИ РЕВЕРСИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

В.В.Кулиш, О.Б.Крутько

В работе предлагается новый тип ускорителя заряженных частиц, не обладающий характерными для большинства известных ускорителей недостатками (большие габариты, обратный ионный ток (для линейных), необходимость пропускать через один и тот же рабочий объем пучков, разных по масштабам энергии (для циклических)) [1].

Идея таких ускорителей на качественном уровне была сформулирована в работе [2]. Суть идеи состоит в следующем (рис. 1). Ускоряющая секция представляет собой систему со скрещенными поперечными периодически реверсивными по длине магнитным и вихревым электрическим полями, смещенными относительно друг друга на угол $\sim \pi/2$. За счет действия ондуляторной магнитной компоненты поля частица движется по "слаломной" траектории, постоянно ускоряясь электрическим полем в промежутках между поворотами (реверсами). Нетрудно видеть, что описанные периодически реверсивные ускорители являются, по сути, системами индукционного типа. В технологическом плане они наиболее близки к линейным индукционным ускорителям [1]. В этой связи последние планируются как конструктивная основа при их практической реализации. Заметим, однако, что в силу криволинейности траекторий частиц и силовых линий электрического поля (в рабочей области) при прочих равных параметрах такие ускорители должны обладать большим темпом ускорения, чем линейные.

Далее проведем элементарный количественный анализ простейшей поперечно неограниченной однородной модели периодически реверсивного индукционного электронного ускорителя. Практически это означает, что характерный поперечный размер релятивистского электронного пучка $a \gg r_d$ (где r_d — дебаевский радиус плазмы). Пучок считаем зарядово-скомпенсированным за счет неподвижного ионного фона. Фактом движения ионов фона пренебрегаем. Напряженность вихревого электрического и индукции

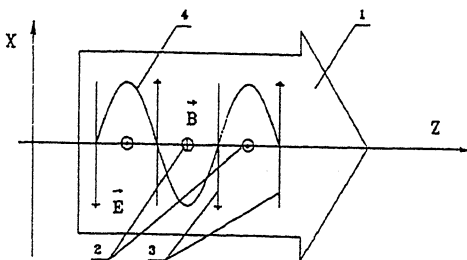


Рис. 1. Модель ускоряющей секции периодически реверсивного ускорителя: 1 — поток ускоряемых электронов; 2 — внешнее поперечное периодически реверсивное магнитное поле \mathbf{B}_p ; 3 — ускоряющее поперечное периодически реверсивное вихревое электрическое поле \mathbf{E}_p ; 4 — траектория электрона во внешних полях.

магнитного поля, создаваемых внешними системами, задаем в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_p(z, t) &= 0.5(E_p e^{ip} + E_p^* e^{-ip}) \mathbf{e}_x; \\ \mathbf{B}_p(z, t) &= 0.5(B_p e^{ip} + B_p^* e^{-ip}) \mathbf{e}_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_p и B_p — комплексные амплитуды; $p = k_p z$ — фаза; $k_p = 2\pi/\lambda$, λ — период ондуляции полей по оси z . Так как электрическое поле создается переменной во времени компонентой магнитного поля, то необходимо, чтобы период изменения амплитуды магнитного поля во времени был значительно больше времени пролета электронов ускоряющей области, т. е.

$$\frac{\partial B_p}{\partial t} \ll \frac{2\pi \langle v_z \rangle}{L} B_p; \quad \frac{\partial E_p}{\partial t} \ll \frac{2\pi \langle v_z \rangle}{L} E_p, \quad (2)$$

где $\langle v_z \rangle$ — средняя продольная скорость пучка, L — длина ускоряющей области. При выполнении этого условия электрическое и магнитное поля будут для электронов в одной и той же ускоряющей фазе все время взаимодействия. Помимо внешних, в результате реализации нелинейных механизмов взаимодействия, в пучке возникают и собственные квазистатические поля. Из них учитываем дополнительное ондуляторное магнитное поле, возникающее вследствие диамагнитного эффекта:

$$\mathbf{E}_s(z, t) = 0.5(B_s e^{ip} + B_s^* e^{-ip}) \mathbf{e}_y, \quad (3)$$

и продольное электростатическое

$$\mathbf{E}_{sn}(z) = E_{sn}(z) \mathbf{e}_z, \quad (4)$$

генерируемые как результат ускорения электронов пучка и связанное с нарушением квазинейтральности в области ускорения ($\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ — орты осей x, y, z соответственно).

В качестве рабочего используем метод усредненного кинетического уравнения в сочетании с методом медленно меняющихся амплитуд [3-5].

В итоге соответствующих вычислений получаем рабочие выражения для амплитуды B_s , величины продольного поля E_{sn} и средней по быстрым осцилляциям плотности приобретенной кинетической энергии электронного пучка как целого:

$$B_s = -\frac{i\alpha_2}{\alpha_1^2}(\exp(-i\alpha_1 z) - 1) + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}z - B_p\Omega^2(1 + \Omega^2)^{-1};$$

$$E_{sn} = P_1 \frac{\partial}{\partial z}(|B|^2) + P_2|B||E_p| \sin(\varphi_B - \varphi_E);$$

$$\left\langle \int_{-\infty}^{\infty} mc^2 f(\gamma - \gamma_0) d^3\mathcal{P} \right\rangle_{kz} =$$

$$= -e \int_0^z E_{sn} dz - \frac{e^2}{2c\mathcal{P}_{z0}^2 k} \int_0^z |B||E_p| \sin(\psi_B - \psi_E) dz, \quad (5)$$

где

$$\alpha_1 = k \frac{1 + \Omega^2}{1 + \Omega^2}; \quad \alpha_2 = \frac{\omega_p^2 e^2}{nc^5 k^2 \mathcal{P}_{z0}} \frac{1}{1 + \Omega^2};$$

$$P_1 = -\frac{e\gamma_0}{4mc^2 k^2}; \quad P_2 = -\frac{e}{2c\mathcal{P}_{z0} k} (1 + \gamma_0^2);$$

$$B = \langle B_s \rangle_{kz} + B_p \frac{1}{1 + \Omega^2}; \quad \Omega^2 = \frac{\omega_p^2}{c^2 k^2 \gamma_0};$$

\mathcal{P}_{z0} — проекция начального импульса электронов на ось z ; γ_0 — начальный релятивистский фактор; m — масса электрона; c — скорость света в вакууме; e — модуль заряда электрона; γ — текущий релятивистский фактор; ω_p — плазменная частота; ψ_B — фаза комплексной амплитуды результирующего магнитного поля; ψ_E — фаза комплексной амплитуды электрического поля; $\langle \dots \rangle_{kz}$ — усреднение по фазе kz ; f — функция распределения электронного пучка.

Следует обратить особое внимание на выражение для плотности энергии электронного пучка, которая прямо пропорциональна квадрату заряда, что свидетельствует об уникальном свойстве предложенного ускорителя — зарядовой инвариантности. Таким свойством обладает очень небольшое число известных ускорителей (серфотроны и др.).

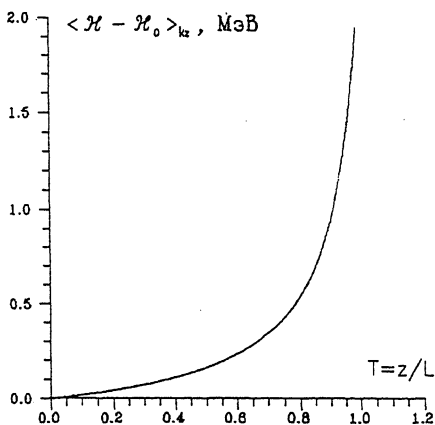


Рис. 2. Усредненная по быстрым осцилляциям кинетическая энергия, приобретенная электроном пучка при прохождении ускоряющей секции периодически реверсивного ускорителя. $(\mathcal{H} - \mathcal{H}_0)$ — средняя для электрона в пучке приобретенная кинетическая энергия; \mathcal{H}_0 — начальная энергия электрона в пучке; $T = z/L$ — нормированная на длину ускоряющей секции продольная координата.

Достоинства таких систем хорошо известны: отсутствие обратного ионного тока и возможность использования в качестве ускорителя плазменных потоков, содержащих частицы обоих знаков. Как интересную физическую особенность взаимодействия электронного пучка с поперечными электрическим и магнитным полями следует считать генерацию высокочастотной составляющей собственного магнитного поля. Причем частота его осцилляций будет превышать частоту осцилляций внешнего магнитного поля, вследствие чего результирующее магнитное поле будет иметь вид биеений. Зависимость приобретенной одним электроном кинетической энергии по длине ускоряющей области показана на рис. 2 ($\gamma_0 = 1.33$, $L = 1\text{ м}$, $\omega_p = 2.006 \cdot 10^{11}$ Гц, $|B_p| = 5$ кГс, $\lambda = 2$ см, $|E_p| = 47.78$ ед. СГС).

Список литературы

- [1] Комар В.Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975.
- [2] Кул и В.В. Деп. в УкрНИИНТИ, № 1526-Ук 90. Киев, 1990. 192 с.
- [3] Кулиш В.В. // УФЖ. 1991. Т. 36. № 9. С. 1318–1325.
- [4] Кулиш В.В., Лысенко А.В. // УФЖ. 1991. Т. 36. № 10. С. 1485–1492.
- [5] Мигулин В.П. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988. 392 с.

Сумский государственный
университет

Поступило в Редакцию
14 декабря 1994 г.